

**НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ**  
**«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ**  
**ІМЕНІ ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»**

Факультет електроніки  
Кафедра електронних приладів та пристроїв

«На правах рукопису»  
УДК 621.385.64

**«До захисту допущено»**

Завідувач кафедри, проф., д.т.н.

\_\_\_\_\_ Л.Д. Писаренко  
“ \_\_\_\_ ” \_\_\_\_\_ 2018 р.

**Магістерська дисертація**  
**на здобуття ступеня магістра**  
**зі спеціальності 171 –Електроніка**  
**Спеціалізація «Електронні прилади та пристрої»**

на тему: **Генератор високочастотних сигналів**

**Виконав:**

Студент 6 курсу, групи ДЕ-371МП Іченський Владислав Сергійович \_\_\_\_\_

**Науковий керівник:**

Професор, д.т.н., с.н.с.

**Жовнір М.Ф.**

\_\_\_\_\_

**Нормоконтроль:**

Доцент, к.т.н.

**Чадюк В.О.**

\_\_\_\_\_

**Рецензент:**

Доцент кафедри мікроелектроніки,  
канд.техн. наук, доцент

**Івашук А.В.**

\_\_\_\_\_

Засвідчую, що у цій магістерській  
дисертації немає запозичень з праць інших  
авторів без відповідних посилань

Студент \_\_\_\_\_  
(підпис)

**Київ – 2018**

**Національний технічний університет України  
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»**

Факультет (інститут) \_\_\_\_\_ Е л е к т р о н і к и

Кафедра \_\_\_\_\_ Електронні прилади та пристрої

Рівень вищої освіти – другий (магістерський) за освітньо-науковою програмою

Спеціальність (спеціалізація) –171– Електроніка (Електронні прилади та пристрої)

**ЗАТВЕРДЖУЮ**

Завідувач кафедри, проф., д.т.н.

\_\_\_\_\_ Л.Д. Писаренко

«\_\_\_» \_\_\_\_\_ 2018 р.

**ЗАВДАННЯ**

**на магістерську дисертацію студенту**

**Іченський Владислав Сергійович**

**1. Тема дисертації:** Генератор високочастотних сигналів

і науковий керівник Жовнір Микола Федорович, професор, д.т.н., с.н.с.

затверджені наказом по університету від «\_\_\_\_\_» \_\_\_\_\_ 2018 р. № \_\_\_\_\_

**2. Строк подання студентом дисертації:** «\_\_\_\_\_» \_\_\_\_\_ 2018 р.

**3. Об'єкт дослідження:** Генератор високочастотних сигналів

**4. Предмет дослідження:** Огляд різних конструкцій магнетронів та розробка методик інженерного розрахунку електричного режиму і простору взаємодії електронного потоку з електромагнітним полем та конструктивних параметрів резонаторної системи магнетрона безперервної дії з вихідною потужністю 50...100 Вт на частоті  $9375 \pm 25$  МГц.

**5. Перелік завдань, які потрібно розробити:** Анотація; вступ; огляд науково-технічної літератури по магнетронним генераторам; методики інженерного розрахунку електричного режиму і простору взаємодії електронного потоку з електромагнітним полем магнетрона безперервної дії; висновки; список науково-технічної літератури.

**6. Орієнтовний перелік графічного (ілюстративного) матеріалу:** Складальне креслення магнетрона; плакати з формулами, графіками та висновками.

**7. Дата видачі завдання:** 10.09.2018 р.

### Календарний план

№ з/п	Назва етапів виконання магістерської дисертації	Термін виконання етапів магістерської дисертації	Примітка
1.	Огляд науково-технічної літератури по магнетронним генераторам	20.09.2018	
2.	Теоретичне обґрунтування побудови та принципу роботи магнетронів	20.10.2018	
3.	Методика розрахунку електричного режиму і простору взаємодії електронного потоку з електромагнітним полем	10.11.2018	
4.	Методика розрахунку конструктивних параметрів резонаторної системи магнетрона безперервної дії	20.11.2018	
5.	Оформлення графічної частини, пояснювальної записки, плакатів, підготовка доповіді	30.11.2018	

Студент гр. ДЕ-371МП

В.С.Іченський

Науковий керівник

М.Ф.Жовнір

## **Р Е Ф Е Р А Т**

**Генератор високочастотних сигналів /** Магістерська дисертація зі спеціальності **171– Електроніка** спеціалізації **«Електронні прилади та пристрої»**. Іченський В.С. НТУУ «КПІ імені Ігоря Сікорського». Факультет електроніки, кафедра електронних приладів та пристроїв. Група ДЕ-371МП. – К.: НТУУ «КПІ імені Ігоря Сікорського», 2018. – 79 с. іл. 15, табл.8.

**Ключові слова:** НВЧ – надвисокі частоти; магнетрон; ЛБХ – лампа біжучої хвилі ; ЛЗХ – лампа зворотної хвилі; КСХ – коефіцієнт стоячої хвилі; ТКЧ –температурний коефіцієнт частоти; К.К.Д. – коефіцієнт корисної дії.

**Короткий зміст роботи:** Представлено порівняльну характеристику параметрів магнетронних генераторів. Приведено принцип роботи багаторезонаторного магнетрона, методики розрахунків резонаторів магнетрона типів щілина-отвір та секторного типу. Приведена методика інженерного розрахунку електричного режиму і простору взаємодії електронного потоку з електромагнітним полем резонатора магнетрона.

Приведено результати інженерного розрахунку електричного режиму і простору взаємодії електронного потоку з електромагнітним полем резонатора магнетрона з наступними параметрами: частота  $9375 \pm 25$  МГц; вихідна потужність 50...100 Вт при коефіцієнті корисної дії  $35 \pm 5\%$ .

## **А Н О Т А Ц І Я**

В роботі представлено огляд різних конструкцій магнетронів, приведені методики інженерного розрахунку електричного режиму і простору взаємодії електронного потоку з електромагнітним полем та резонаторної системи магнетрона безперервної дії з вихідною потужністю 50...100 Вт на частоті  $9375 \pm 25$  МГц, коефіцієнтом корисної дії  $35 \pm 5\%$ .

## **S U M M A R Y**

In work the inspection of different constructions of magnetrons, methodics of engineering calculation of electrical regime and the space of the interaction electronic flow with electrical-magnetical field and resonator system of continuous-action magnetron with output power 50...100 W on the frequency  $9375 \pm 25$  MHz, the coefficient of useful action  $35 \pm 5\%$  are represented.

## З М І С Т

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ .....	7
В С Т У П .....	8
1. КЛАСИФІКАЦІЯ ТА ХАРАКТЕРИСТИКИ МАГНЕТРОННИХ ГЕНЕРАТОРІВ .....	13
1.1. Імпульсні магнетрони звичайної конструкції .....	14
1.2. Коаксіальні магнетрони .....	21
1.3. Магнетрони безперервного режиму .....	26
1.4. Мітрони .....	31
2. ТЕОРЕТИЧНА ЧАСТИНА .....	37
2.1. Функціональна схема та принцип дії багаторезонаторного магнетрона .....	37
2.2. Методика розрахунку резонатора типу щілина-отвір .....	53
2.3. Методика розрахунку резонатора секторного типу .....	57
2.4. Методика інженерного розрахунку електричного режиму і простору взаємодії електронного потоку з електромагнітним полем резонатора магнетрона.....	61
2.4.1. Парабола критичного режиму .....	62
2.4.2. Потенціал синхронізації .....	65
2.4.3. Порогова напруга .....	67
2.4.4. Вольт-амперна характеристика та коефіцієнт корисної дії магнетрона .....	70
3. КОНСТРУКТИВНО-ТЕХНОЛОГІЧНІ ОСОБЛИВОСТІ МАГНЕТРОНА .....	73
В И С Н О В К И .....	75
ПЕРЕЛІК ВИКОРИСТАНОЇ НАУКОВО-ТЕХНІЧНОЇ ЛІТЕРАТУРИ .....	76

## **ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ**

НВЧ – надвисокі частоти

ЛБХ – лампа біжучої хвилі

ЛЗХ – лампа зворотної хвилі

КСХ – коефіцієнт стоячої хвилі

ТКЧ – температурний коефіцієнт частоти

К.К.Д. – коефіцієнт корисної дії

## В С Т У П

Розвиток радіолокації, радіорелейного і космічного зв'язку, телебачення, радіонавігації, промислової і побутової електроніки, радіоастрономії, радіоспектроскопії, ядерної фізики, медицини і багатьох інших, галузей науки і техніки нерозривно зв'язаний із широким використанням надвисоких частот (0,3...3000 ГГц). У залежності від довжини хвилі електромагнітних коливань НВЧ розбиваються на діапазони: дециметрових (0,3...3 ГГц), сантиметрових (3...30 ГГц), міліметрових (30...300 ГГц) і субміліметрових (300...3000 ГГц) хвиль.

Діапазони дециметрових і сантиметрових хвиль найбільш освоєні й одержали широке практичне застосування. Однак останнім часом став виявлятися підвищений інтерес до використання міліметрових хвиль у радіолокаційних системах з високою здатністю, радіорелейних лініях зв'язку, системах схованого зв'язку з космічними апаратами, радіоастрономії і радіоспектроскопії. Використання діапазону НВЧ у зазначених областях застосування стало можливим завдяки створенню і виробництву всіх необхідних електронних приладів, що забезпечують у цьому діапазоні генерування коливань, посилення і перетворення сигналів, комутацію приймально-передавальних трактів.

У зв'язку з великою розмаїтістю виконуваних функцій, розходженням вимог до технічних характеристик приладів і обмеженим робочим діапазоном частот кожного приладу для перекриття всього діапазону НВЧ потрібна була широка номенклатура електронних НВЧ приладів. Разом з тим унаслідок конкуренції між виготовлювачами й окремими напрямками електроніки НВЧ створено багато приладів того самого функціонального призначення з близькими значеннями параметрів і технічних характеристик.

З метою систематизації розгляду стану й аналізу тенденцій розвитку НВЧ приладів усе їхнє різноманіття доцільне звести до чотирьох груп



приладів, що відрізняється між собою по використовуваних фізичних принципах.

I група – електровакуумні НВЧ прилади, засновані на використанні явищ проходження струму у вакуумі;

II група — твердотільні прилади і НВЧ пристрої, створені на основі використання властивостей напівпровідникових приладів і феритів.

Зазначена система класифікації відбиває найбільш значні розходження приладів, підкреслює специфічні особливості конструкції і технології їхнього виготовлення і не суперечить сформованим традиціям розподілу приладів на класи, види і типи.

**I. Електровакуумні НВЧ прилади** являють собою найбільш численну групу, що включає прилади з електростатичним (сітковим) і електродинамічним керуванням.

1. До приладів з електростатичним керуванням відносяться металокерамічні тріоди і тетроди, прилади з гальмуючим полем. Ці прилади знайшли широке застосування в діапазоні НВЧ завдяки створенню спеціальних конструкцій, що знижують шкідливий вплив часу прольоту електронів на роботу приладів. Незважаючи на тривалу історію існування і розвитку цих приладів процес їхнього удосконалювання безупинно продовжується в напрямках підвищення ефективності і надійності роботи, збільшення вихідної потужності, освоєння короткохвильової частини сантиметрового діапазону хвиль, а також в області створення герметизованих багатофункціональних модулів.

2. До приладів з електродинамічним керуванням відносяться прилади магнетронного типу, лампи бігучої (ЛБХ) і зворотної (ЛЗХ) хвилі, клістри.

2.1. Прилади магнетронного типу включають себе автогенератори і підсилювачі, що працюють у схрещених електричних і магнітних полях.

До автогенераторів відносяться магнетрони звичайної конструкції, коаксіальні магнетрони, зворотньо-коаксіальні магнетрони, магнетрони з електронним настроюванням частоти, лампи зворотної хвилі магнетронного типу і стабілотрони. Зазначені види приладів, у свою чергу, підрозділяються по режиму роботи на імпульсні і безупинні дії, а за рівнем потужності — на надпотужні і потужні, середньої потужності і малопотужні. Серед них найбільш розповсюдженими є магнетрони звичайної конструкції, що працюють в імпульсному і безупинному режимах. Разом з тим в останні десять років велика увага приділяється розвитку коаксіальних магнетронів, що усе більш широко застосовуються замість магнетронів звичайної конструкції.

До підсилювачів магнетронного типу відносяться амплітрони, прилади з інжектованим електронним потоком із прямої (ЛБХ магнетронного типу) і зворотної (ЛЗХ магнетронного типу) хвилею, а також прилади з незамкнутим електронним потоком і прямою хвилею. Магнетронні підсилювачі, так само як автогенератори, підрозділяються по режиму роботи на імпульсні і безупинні дії, а за рівнем потужності — на надпотужні і потужні, середньої і малої потужності.

2.2. Лампи біжучої хвилі О-типу, (з подовжнім електричним і магнітним полями) складають також великий клас електровакуумних НВЧ приладів з електродинамічним керуванням. До складу цього класу приладів входять підсилювальні ЛБХ із різними рівнями вихідної потужності і малопотужні підсилювальні ЛБХ. Підсилювальні ЛБХ за рівнем вихідної потужності підрозділяються на надпотужні і потужні, середньої потужності і малопотужні. Надпотужні і потужні ЛБХ, крім того, поділяються на ЛБХ імпульсного і безупинного режимів.

Останнім часом велика увага приділяється створенню широкополосних і дворежимних ЛБХ, мініатюрних ЛБХ, у тому числі з друкованими

системами, що сповільнюють, для фазированих антенних ґрат, ЛБХ середньої потужності для космічних апаратів.

2.3. Лампи зворотної хвилі О-типу складають порівняно невеликий клас НВЧ приладів. Ці прилади використовуються як НВЧ генератори з електронною перебудовою частоти в діапазонах від дециметрових до субміліметрових хвиль винятково в безупинних режимах роботи. По потужності вони підрозділяються на ЛЗХ підвищеної потужності і малопотужні.

2.4. Клістриони складають великий клас НВЧ приладів і за принципом роботи підрозділяються на пролітні і відбивні. Пролітні клістриони містять у собі підсилювальні багаторезонаторні і генераторні клістриони з невеликим числом резонаторів. Ці прилади створюються для роботи в імпульсному і безупинному режимах. Багаторезонаторні підсилювальні клістриони за рівнем вихідної потужності поділяються на надпотужні і потужні. Генераторні містять у собі двох - і трьохрезонаторні клістриони і клістриони з розподіленою взаємодією. Ці клістриони відносяться до приладів малої і середньої потужності. Відбивні клістриони створюються для використання в якості малопотужних НВЧ генераторів безупинного режиму роботи.

**II. Твердотільні прилади і НВЧ пристрої** являють собою нову велику групу НВЧ приладів, розвитку яких останнім часом приділяється дуже велика увага. Підвищений інтерес до цих приладів і пристроїв викликаний головним чином їх великими потенційними можливостями для успішного рішення проблеми комплексної мініатюризації радіоелектронної апаратури.

До складу цієї групи входять активні і пасивні прилади і НВЧ пристрої.

1. До твердотільних активних приладів і НВЧ пристроїв відносяться генератори і підсилювачі на напівпровідникових НВЧ діодах і транзисторах. Ці прилади по своєму призначенню виконують такі ж функції, як і електровакуумні НВЧ прилади малої потужності, і створюються для заміни останніх.

1.1. Твердотільні НВЧ генератори виконуються на основі тунельних і лавино-пролітних діодів, діодів Ганна, польових і біполярних транзисторів. Ці генератори забезпечують одержання НВЧ коливань як у безупинному, так і в імпульсному режимах. За рівнем потужності вони поділяються на малопотужні і потужні. Подальшим розвитком твердотільних НВЧ генераторів є створення на їхній основі комплексированих пристроїв, що включають генератор, схему керування частотою, джерело живлення й ін.

1.2. Твердотільні НВЧ підсилювачі створюються на основі тунельних, варакторних і лавино-пролітних діодів, діодів Ганна, біполярних і польових транзисторів. Вони підрозділяються на малошумні і підсилювачі потужності. Твердотільні НВЧ підсилювачі, так само як генератори, випускаються в багатьох випадках разом із джерелами живлення.

2. Пасивні НВЧ пристрої складаються з різних елементів НВЧ діапазону, що забезпечують детектировання, перетворення і множення частоти, зміну фази НВЧ коливань, розв'язку і переключення каналів, обмеження НВЧ потужності. До цих пристроїв відносяться детектори і змішувачі, множники частоти і фазообертачі, перемикачі й обмежники потужності, вентилі і циркулятори. Вони створюються на основі застосування напівпровідникових НВЧ діодів і ферритів. Пасивні НВЧ пристрої використовуються і випускаються в якості окремих дискретних приладів.

### **Завданням роботи є:**

Порівняльний огляд конструкцій та параметрів магнетронних генераторів.  
Розробка методики інженерного розрахунку електричного режиму і простору взаємодії електронного потоку з електромагнітним полем резонатора магнетрона з наступними параметрами: частота  $9375 \pm 25$  МГц; вихідна потужність 50...100 Вт при коефіцієнті корисної дії  $35 \pm 5\%$ .

## **1. КЛАСИФІКАЦІЯ ТА ХАРАКТЕРИСТИКИ МАГНЕТРОННИХ ГЕНЕРАТОРІВ**

В якості джерел коливань великої потужності в діапазоні НВЧ широко застосовуються прилади магнетронного типу (М-типу), основними достоїнствами яких є високий ККД, компактність, порівняно невисокі робочі напруги і відсутність жорсткого рентгенівського випромінювання. До цих приладів відносяться багато різновидів генераторних і підсилювальних приладів, що працюють у схрещених електричних і магнітних полях, у тому числі імпульсні магнетрони звичайної конструкції, коаксіальні і коаксіально-звернені магнетрони, мітрони, магнетронні підсилювачі, магнетрони безперервного режиму і лампи зворотної хвилі М-типу (ЛЗХМ). [1...4].

За допомогою приладів М-типу до теперішнього часу досягнуті значні рівні потужності як в імпульсному, так і в безперервному режимах роботи. В імпульсному режимі найбільша вихідна потужність отримана на підсилювачах М-типу і на магнетронах звичайної конструкції. Вона досягає 10 МВт на  $f=0,5...2$  ГГц, 1 МВт на  $f=10$  ГГц і більш 200 кВт на  $f=30$  ГГц.

У безперервному режимі отримання високих рівнів вихідної потужності забезпечується за допомогою магнетронів безперервного режиму і ЛЗХМ. Найбільша потужність досягнута на частотах 0,915 і 2,45 ГГц, виділених відповідно до міжнародної угоди для НВЧ нагрівальної апаратури промислового і побутового призначення. Вона складає на цих частотах 100 і 10 кВт відповідно. Максимальна потужність дорівнює 10 кВт на частоті 3 ГГц, 600 Вт на частоті 10 ГГц і 100 Вт на частоті близько 20 ГГц. Прилади М-типу відрізняються від інших НВЧ приладів більш високою ефективністю перетворення енергії постійного струму в енергію НВЧ коливань. Найбільш

високий ККД досягається на підсилювачах М-типу і магнетронах імпульсного і безперервного режимів роботи. Прилади М-типу серед інших потужних генераторних і підсилювальних НВЧ приладів є найбільш компактними і характеризуються високим відношенням вихідної потужності до маси приладу.

Для потужних приладів імпульсного режиму відношення середньої потужності до маси лежить у межах 50...100 Вт/кг. Більш високі значення цього відношення досягнуті у мітронів (170 Вт/кг) і магнетронів безперервного режиму (150 Вт/ кг) головним чином за рахунок застосування нових високоефективних магнітних матеріалів.

Прилади М-типу в залежності від рівня вихідної потужності працюють при анодних напругах  $U_a = 2...100$  кВ. На приладах інших типів, наприклад на підсилювальних клістронах імпульсного режиму, аналогічні рівні потужності досягаються при анодних напругах у 1,5...2 рази більших, ніж у приладів М-типу. У зв'язку з цим потужні прилади М-типу мають порівняно менші рентгенівські випромінювання і не вимагають спеціального захисту.

В даний час закордонними фірмами випускається близько 1500 типів приладів магнетронного типу різних конструкцій з великою розмаїтістю їх технічних і експлуатаційних характеристик. Кількість типів приладів за останні роки практично залишається незмінним, тому що з появою нових приладів відбувається зняття з виробництва застарілих типів.

### **1.1. ІМПУЛЬСНІ МАГНЕТРОНИ ЗВИЧАЙНОЇ КОНСТРУКЦІЇ**

Імпульсні магнетрони є самим розповсюдженим типом НВЧ генераторів, що отримали найбільше застосування в радіолокаційній апаратурі різного призначення. Ці магнетрони в залежності від вихідної потужності прийнято класифікувати на потужні (більше 10 кВт) і

малопотужні (менші 10 кВт). Потужні імпульсні магнетрони застосовуються в наземній і корабельній радіолокаційній станціях пошуку і спостереження з великою дальністю дії, а також у бортових радіолокаційних станціях тактичного призначення. Області застосування малопотужних імпульсних магнетронів більш різноманітні: у літакових доплерівських радіолокаційних станціях, маяках, станціях забезпечення польоту за траєкторією, переносних станціях виявлення цілей і в іншій апаратурі. Технічний рівень цих приладів характеризується наступними даними.

**Потужність і частота.** Потужні імпульсні магнетрони працюють на частотах, що лежать у межах 0,4...35 ГГц. Найбільша потужність досягнута на магнетронах дециметрового діапазону хвиль. Вона складає 2,5...5 МВт на частотах 0,4...3 ГГц. Значна потужність отримана також у сантиметровому діапазоні й у довгохвильовій частині міліметрового діапазону: 1 МВт на частоті 10 ГГц і 100 кВт на частоті 35 ГГц. Є відомості про створення імпульсного магнетрона з потужністю в імпульсі 1700 МВт на частоті 3 ГГц. Цей магнетрон має графітовий автоелектронний катод і працює при  $U_a=360$  кВ,  $I_a=12$  кА і тривалості імпульсу 30 нс. Параметри окремих найбільш розповсюджених типів потужних імпульсних магнетронів приведені в табл.1.1.

**Таблица 1.1**

**Параметри деяких типів потужних імпульсних магнетронів**

Тип приладу	Фірма-виробник	$f$ , ГГц	$P_u$ , МВт	$U_a$ , кВ	$I_a$ , А	$m$ , кг
QK516	Raytheon	0,4...0,45	2,0	55	97	100
QKH666	Raytheon	1,32...1,35	5,0	72	150	57
M5094A	English Electric V.	3,0...3,2	1,0	36	80	40
M579	English Electric V.	3,05...3,16	2,5	43	170	4,5
VF30	Feranti Ltd.	5,2...5,6	1,5	25	90	4,5
L3030B	Litton	8,97...9,03	0,3	29	27	6,5
VF20	Feranti Ltd.	16...17	0,4	26	40	6,5
VF55	Feranti Ltd.	34,6...35,4	0,1	23	20	6,5

**Перебудова частоти.** Поряд з магнетронами на фіксовані частоти окремими фірмами випускаються магнетрони з механічною (повільною та швидкою) перебудовою частоти. Максимальний діапазон плавної перебудови досягає 5...7 %, а швидкої — декількох десятків мегагерц. Окремі типи магнетронів зі швидкою перебудовою забезпечують зміну частоти від імпульсу до імпульсу і використовуються в радіолокаційних станціях із селекцією рухомих цілей (СРЦ). Однак у даний час через недостатню стабільність частоти і малої надійності роботи ці магнетрони замінюються магнетронами коаксимальної конструкції, що перебудовуються.

**Стабільність частоти.** Стабільність роботи імпульсних магнетронів характеризується температурним коефіцієнтом (ТКЧ), електронним зсувом (ЕЗЧ) і затягуванням частоти. Для потужних імпульсних магнетронів типові значення ТКЧ складають 30...40 кГц/°С, ЕЗЧ = 1,5...15 МГц/А и затягування частоти 5...60 МГц. Найменші значення цих параметрів відносяться до магнетронів дециметрового діапазону, а найбільші — до магнетронів довгохвильової частини міліметрового діапазону.

**Тривалість імпульсу.** Потужні імпульсні магнетрони розраховані в основному на роботу при тривалості імпульсу 1 мкс, однак окремі типи магнетронів допускають роботу при тривалості до 5...10 мкс. Коефіцієнт заповнення 0,1...0,2 %.

**ККД.** Для потужних магнетронів досягнення високих значень ККД має особливо важливе значення. Тому всі міри, що починаються для його підвищення, насамперед реалізовані при конструюванні могутніх магнетронів. Кращі значення ККД складають 80...85% у дециметровому діапазоні, 80% на частоті 3 ГГц, 55% на частоті 10 ГГц і 30% на частоті 35 ГГц.



**Маса.** Потужні імпульсні магнетрони як пакетовані, так і з зовнішньою магнітною системою мають досить велику масу, що у самих потужних магнетронів дециметрового діапазону досягає 100 кг.

**Довговічність.** Гарантійний термін служби потужних імпульсних магнетронів лежить в межах 1...2 тисяч годин. Фактичний середній термін служби багатьох типів магнетронів досягає 10 тисяч годин. Серед магнетронів, що мають велику довговічність, можна відзначити, наприклад, магнетрон MAG21 3-см діапазону з  $P_{\text{и}}=100$  кВт, гарантований термін служби якого 2 тисяч годин. У магнетрона VMX1090 фірми Varian, що працює в тім же діапазоні частот з  $P_{\text{и}}=200$  кВт, очікуваний термін служби 3 тисяч годин.

Потужні імпульсні магнетрони випускаються переважно пакетованої конструкції з постійними магнітами і з примусовим чи природним охолодженням. Вихід НВЧ енергії в магнетронів дециметрового діапазону коаксіальний, а в магнетронів сантиметрового і міліметрового діапазонів — хвилевідний.

Характерним прикладом конструктивного оформлення сучасних потужних імпульсних магнетронів є магнетрон типу F1103 фірми Thomson-CSF. Цей магнетрон має пакетовану конструкцію, хвилевідний вихід НВЧ енергії і розрахований на роботу з механічною перебудовою частоти в діапазоні 8,5...9,6 ГГц. Його  $P_{\text{и}}=200$  кВт при коефіцієнті заповнення 0,001,  $U_{\text{а}}=22,5$  кВ і  $I_{\text{а}}=27,5$  А.

Випуск потужних імпульсних магнетронів звичайної конструкції з кожним роком скорочується. Це пов'язано з тим, що в новій радіоелектронній апаратурі застосовуються переважно коаксіальні магнетрони, що володіють значними перевагами в порівнянні з магнетронами звичайної конструкції. Серед імпульсних магнетронів значну частину складають

магнетрони малої потужності, що широко застосовуються в різній радіоелектронній апаратурі. В даний час з 770 типів рекламованих магнетронів звичайної конструкції більш 320 типів відносяться до числа магнетронів малої потужності. Технічний рівень малопотужних імпульсних магнетронів характеризується наступними даними.

**Частота і потужність.** Магнетрони малої потужності створені на частоти 0,35...97 ГГц (найбільше число типів на 8...10 ГГц). Вихідна потужність магнетронів у межах 100 Вт...10 кВт в імпульсі. Деяке представлення про параметри малопотужних імпульсних магнетронів дають дані, приведені в табл.1.2.

**Таблиця 1.2**

**Параметри окремих типів малопотужних імпульсних магнетронів**

Тип приладу	Фірма-виготовлювач	$f$ , ГГц	$P_u$ , кВт	$U_a$ , кВ	$I_a$ , А	$m$ , кг
BLM167	Varian	5,2...5,7	0,9	2,8	1,5	0,29
BL250	Varian	5,4...5,9	0,15	1,35	1,0	0,23
M5097	Electric Valve	9,2...9,6	6,75	4,6	6	1,25
VJ1390	Ampereh	9,38...9,44	1,4	2,2	2,5	1,0
M5117	Electric Valve	9,40...9,72	9	5,6	5,0	1,0
MAG17	Electric Valve	9,0...11,0	0,18	0,9	1,0	0,24
BLM162	Varian	16,4...16,6	10	9	5,25	0,57
MA286	Microwave Ass.	35,7...36,2	1	3,6	1,75	0,46

**Перебудова частоти.** Малопотужні магнетрони випускаються на фіксовані частоти, а також з механічною й електромеханічною перебудовою частоти. Діапазон механічної перебудови частоти складає 5...7% від номінальної частоти, при електромеханічній перебудові 2...3%.

**Стабільність частоти.** У малопотужних магнетронів, як і у всіх магнетронів звичайної конструкції, стабільність частоти коливань залежить

від змін температури навколишнього середовища, КСХ навантаження й анодного струму магнетрона і характеризується відповідними коефіцієнтами. Мінімальне значення температурного коефіцієнта частоти (ТКЧ) для магнетронів, що працюють у діапазонах частот 3...16 ГГц, складає 30...40 кГц/°С. Це досягається заміною мідної резонаторної системи молібденовою і введенням у конструкцію магнетрона елементів термокомпенсації. Наприклад, мінімальне значення ТКЧ 30 кГц/°С має магнетрон BLM207 фірми Varian на  $f=9,3$  ГГц із  $P_u=0,55$  кВт при  $K_3=0,002$ ,  $U_a=2,4$  кВ і  $I_a=1,2$  А в імпульсі.

Коефіцієнт затягування частоти, що характеризує вплив неузгодженості навантаження на частоту магнетрона, звичайно лежить у межах 1,5...60 МГц при гранично припустимих значеннях КСХ. Наприклад, мінімальне затягування частоти 2 МГц має магнетрон BLM153 тієї ж фірми на  $f=5,7...5,8$  ГГц із  $P_u=5$  кВт при  $K_3=0,001$ ,  $U_a=5$  кВ і  $I_a=4,5$  А в імпульсі.

Коефіцієнт електронного зсуву частоти малопотужних магнетронів лежить у межах 1,5...30 МГц/А. Наприклад, мінімальний електронний зсув частоти 1,5 МГц/А має магнетрон M5031 фірми English Electric V. на  $f=9,35$  ГГц із  $P_u=9,5$  кВт при  $K_3=0,0025$ ,  $U_a=6,2$  кВ і  $I_a=5,5$  А в імпульсі.

Для підвищення стабільності частоти малопотужних імпульсних магнетронів у деяких випадках використовуються способи стабілізації частоти від зовнішнього високостабільного НВЧ генератора. Ці способи поряд зі стабілізацією частоти можуть застосовуватися і для керування фазою імпульсів вихідного сигналу.

**Час готовності.** Для магнетронів, використовуваних в окремих видах радіоелектронних пристроїв (наприклад, у бортовій апаратурі ракет), дуже важливим параметром є їхній час готовності. У магнетронів такого

призначення час готовності, відлічуваний з моменту включення напруг розжарення й анодного блоку до досягнення 80% рівня вихідної потужності, дорівнює 2...10 с. Для одержання такого малого часу готовності при конструюванні магнетронів приймаються спеціальні заходи для забезпечення найбільш швидкого розігріву катода (зменшення маси катода, застосування спеціальних матеріалів і зниження робочої температури катода). Прикладом магнетрона з малим часом готовності може служити магнетрон типу MAG17, параметри якого приведені в табл.1. 2. Час готовності магнетрона менше 3 с.

**Тривалість імпульсу.** Для магнетронів малої потужності велике значення має можливість роботи при малих тривалостях імпульсів, особливо при використанні їх у бортових висотомірах. Тому що малопотужні магнетрони мають дуже малий час устанавлення НВЧ коливань і малим тремтінням фронту імпульсу, вони дозволяють працювати при дуже коротких імпульсах — тривалістю до 10 нс. Ці ж магнетрони нормально працюють при звичайних тривалостях імпульсів 1...2 мкс.

**Анодна напруга.** Малопотужні імпульсні магнетрони в залежності від потужності і робочої частоти працюють при  $U_a=0,8...10$  кВ. Мінімальні значення відносяться до магнетронів довгохвильової частини сантиметрового діапазону з вихідною потужністю в кілька сотень ватів, а максимальні — до магнетронів короткохвильової частини сантиметрового і міліметрового діапазонів із  $P_{вих}$  до 10 кВт.

**Маса.** Малопотужні імпульсні магнетрони є дуже компактними приладами і мають невелику масу ( $m=0,2...2$  кг). Найменшу масу мають магнетрони короткохвильової частини сантиметрового діапазону з  $P_u=40... 250$  Вт і  $P_{cp}=0,2...2,5$  Вт. Ці магнетрони розроблені фірмами Varian і Microwave Ass. і мають  $m=0,2...0,35$  кг. Серед них самим найлегшим є

магнетрон BL212, що працює на  $f=5,4...5,9$  ГГц із  $P_u=100$ Вт. Його  $m=185$  г. У магнетрона типу M5021 фірми English Electric V.  $m\approx 1$  кг. Він має фіксовану робочу частоту в діапазоні  $9,38...9,44$  ГГц і хвилевідний вихід НВЧ енергії,  $P_u=1,4$  кВт при  $K_3=0,1\%$ ,  $U_a=2$  кВ і  $I_a=2,25$ А.

Малопотужні імпульсні магнетрони продовжують відігравати важливу роль у радіоелектронній апаратурі незважаючи на розвиток твердотілих НВЧ генераторів. Вони є найбільш кращими для застосування в апаратурі тому, що дозволяють не тільки досягти необхідної потужності і частоти коливань, але і мають переваги перед твердотілими генераторами НВЧ по ККД, частотній стабільності, можливості роботи при дуже малих тривалостях імпульсів і т.д. Цим, зокрема, і порозумівається те, що випуск імпульсних магнетронів практично не зменшується.

## 1.2. КОАКСІАЛЬНІ МАГНЕТРОНИ

Коаксіальні магнетрони на відміну від звичайних багаторезонаторних мають додатковий стабілізуючий резонатор коаксіального типу. Наявність цього резонатора, винесеного з простору взаємодії з електронним потоком і який володіє високою навантажувальною добротністю, забезпечує підвищену частотну стабільність магнетрона, а також велику довговічність і високу надійність роботи. Зазначені достоїнства коаксіальних магнетронів особливо важливі в короткохвильовій частині сантиметрового діапазону хвиль, де магнетрони звичайної конструкції мають малу довговічність і недостатню надійність. Коаксіальні магнетрони завдяки цим перевагам витісняють магнетрони звичайної конструкції не тільки в розроблювальній і модернізованій радіоелектронній апаратурі, але й в апаратурі, що знаходиться в експлуатації. Затверджується, що заміна звичайного

магнетрона коаксіальним можлива практично в будь-якій апаратурі при її незначній доробці. В даний час серед усіх видів магнетронів більш 60% складають магнетрони коаксіальної конструкції.

Потужні коаксіальні магнетрони застосовуються в наземній і корабельній радіолокаційній станціях пошуку і спостереження, а магнетрони середнього рівня потужності — у радіолокаційних станціях огляду, керування стріляниною, забезпечення польоту по траєкторії, що повторює рельєф місцевості, а також у навігаційній і метеорологічній апаратурі на борту літаків і кораблів. Малопотужні коаксіальні магнетрони (з  $P_u < 10 \text{ кВт}$ ) використовуються в маяках, імпульсних доплерівських системах на борту літаків і ракет, а також у портативних радіолокаційних станціях.

За кордоном випускається більше 200 типів коаксіальних магнетронів на різні частоти і рівні потужності, призначених винятково для роботи в імпульсних режимах. Технічний рівень цих магнетронів характеризується наступними даними.

**Частота і потужність.** Коаксіальні магнетрони створені на частоти 2,7...35 ГГц із  $P_u = 0,2 \text{ кВт} \dots 3 \text{ МВт}$  і середньою потужністю від декількох ватів до 2,2 кВт. З них найбільше число призначене для роботи в короткохвильовій частині сантиметрового діапазону.

Необхідність подальшого збільшення довговічності і підвищення надійності імпульсних генераторів міліметрового діапазону хвиль привели до створення ще одного різновиду магнетронів, що одержали назву зворотньо-коаксіальних. На відміну від коаксіальних додатковий стабілізуючий резонатор обернено-коаксіального магнетрона розташований усередині приладу, а кільцевий катод — з його зовнішньої сторони. Така конструкція дозволяє значно розвинути катодну частину магнетрона і знизити питоме

навантаження катода і відповідно підвищити довговічність приладу в цілому. Зворотньо-коаксіальні магнетрони створені на частотах 20...35 ГГц із  $P_u=10 \dots 150$  кВт, однак практичного застосування в апаратурі вони поки не одержали.

**Перебудова частоти.** Більшість коаксіальних магнетронів дозволяє робити перебудову робочої частоти. При цьому повільна перебудова може відбуватися в межах до 13% від номінальної частоти, а швидка — у межах до 5% у залежності від застосовуваного способу перебудови робочої частоти і потужності. Максимальні межі швидкої перебудови частоти для магнетронів з вібраційною перебудовою досягають 5%, з електромагнітною 3,5%, з гіронастроювачем 2% і з п'єзоелектричною перебудовою 1% від номінальної частоти. Максимальна швидкість перебудови при цьому в магнетронах з перебудовою складає 220, з електромагнітною 400, з гіронастроювачем 800 і з п'єзоелектричною перебудовою 1000 циклів у секунду.

Способи швидкої перебудови магнетронів продовжують безупинно удосконалюватися для досягнення більш високої швидкості і підвищення терміну служби застосовуваних механізмів перебудови. Поряд з удосконалюванням способів швидкої електромеханічної перебудови закордонними фірмами проводяться інтенсивні дослідження зі здійснення електронної перебудови частоти імпульсних магнетронів. Зокрема, фірмами Thomson—CSF і Raytheon розроблені магнетрони 2- і 3-см діапазонів з перебудовою частоти за допомогою феррітових пластин, розташованих у додатковому резонаторі і керованих магнітним полем спеціального електромагніта. Фірмою Varian ведеться розробка коаксіального магнетрона 2-см діапазону, перебудова частоти якого здійснюється за допомогою  $p-i-n$ -діодів, що є реактивним навантаженням коаксіального резонатора.

Застосування зазначених способів електронної перебудови частоти дозволяє істотно збільшити швидкість перебудови і забезпечити внутрішньо-імпульсне кодування сигналів передавального пристрою радіолокаційних станцій. Деякі магнетрони за способом перебудови частоти є багаторежимними. Вони можуть працювати на фіксованій частоті, з повільною перебудовою, зі швидкою прецизійною перебудовою і з перебудовою частоти від імпульсу до імпульсу. Це розширює області застосування магнетронів і дозволяє використовувати їх у багатофункціональних заводо захищених радіолокаційних станціях.

**Стабільність частоти.** Коаксіальні магнетрони в порівнянні зі звичайними характеризуються більш високою стабільністю частоти тому, що їхні частотні параметри (електронний зсув частоти, ТКЧ, коефіцієнт зтягування частоти, відходи частоти від імпульсу до імпульсу) значно кращі, ніж у магнетронів звичайної конструкції.

Електронний зсув частоти коаксіальних магнетронів знаходиться в межах від 10 кГц/А в 10-см діапазоні до 1 МГц/А в 8-мм, що в 3...10 разів менше значень цього параметра в звичайних магнетронів. ТКЧ коаксіальних магнетронів також у 2...3 рази менше, ніж у магнетронів звичайної конструкції, тому що зовнішній резонатор вилучений від джерела тепла і звичайно виготовляється з інвару, а не з міді. Мінімальні значення ТКЧ складають ~ 60 кГц/°С на частоті 3 ГГц, 100 кГц/°С на частотах до 10 ГГц і 150 кГц/°С на частотах до 35 ГГц.

Коефіцієнт зтягування частоти в кращих коаксіальних магнетронів при КСХ навантаження ~ 1,5 дорівнює 2 МГц на частоті 3 ГГц, 5 МГц на частотах до 16 ГГц і 15 МГц на частотах до 35 ГГц, що також у 3...5 разів менше, ніж у магнетронів звичайної конструкції. Коаксіальні магнетрони,



крім того, характеризуються малими значеннями відходу частоти від імпульсу до імпульсу, що складають десятки кілогерців на частотах до 16ГГц. По кількості пропущених імпульсів вони майже на порядок кращі звичайних магнетронів. Кількість пропущених імпульсів у багатьох типів коаксіальних магнетронів складає 0,1...0,25 %, а в кращих зразків 0,05 %. Зазначені переваги коаксіальних магнетронів є особливо важливими при використанні цих приладів у радіолокаційних станціях із селекцією рухомих цілей (СРЦ).

**ККД.** У короткохвильовій частині сантиметрового діапазону ККД коаксіальних магнетронів, як правило, трохи вище порівнянних магнетронів звичайної конструкції. Максимальні значення ККД у залежності від робочої частоти знаходяться в межах 26...56 %.

**Маса.** Незважаючи на те, що коаксіальні магнетрони мають трохи більший діаметр анода, їхня маса не перевищує масу магнетронів звичайної конструкції. Це пояснюється тим, що висота анодного блоку цих магнетронів менша і відповідно менший зазор у магнітній системі, а тому менші габарити і маса постійних магнітів. Мінімальні значення маси магнетронів у залежності від імпульсної потужності складають 20...25 кг при  $P_u=1$  МВт, близько 3 кг при  $P_u=100$  кВт і 1...2 кг при  $P_u=10$  кВт.

**Довговічність.** Гарантійний термін служби коаксіальних магнетронів знаходиться в межах 1...5 тисяч годин. Найбільший гарантійний термін служби (5 тисяч годин) мають окремі типи магнетронів, що випускаються фірмою EMI-Varian. Фактичний термін служби складає 3...10 тисяч годин, а при роботі в деяких діючих системах він досягає 30 тисяч годин.

Високі значення довговічності забезпечуються завдяки застосуванню в цих приладах деяких заходів для зниження напруженості НВЧ полюси в

просторі катод — анод, зменшенню бомбардування катода і розпиленню його активної речовини, збільшенню числа резонаторів і відповідно зниженню питомої потужності, що розсіюється на ламелях резонаторів, а також за рахунок виключення з конструкції магнетрона вузлів, які можуть спричинити пробій між резонаторами. Застосування коаксіальних магнетронів замість магнетронів звичайної конструкції дозволяє збільшити довговічність радіоелектронної апаратури в 5 разів.

Деяке представлення про параметри й електричні режими роботи імпульсних коаксіальних магнетронів дають відомості, приведені в табл. 3. У табл. 1.3 як приклад приведені дані окремих типів потужних коаксіальних магнетронів. Серед них приведений, зокрема, один з найбільш потужних приладів магнетрон 10-см діапазону типу VMS1143.

**Таблиця 1.3**

**Основні параметри деяких типів  
потужних коаксіальних магнетронів**

Тип приладу	Фірма- виготовлювач	$f$ , ГГц	$P_u$ , МВт	$P_{cp}$ , кВт	$U_a$ , кВ	$I_a$ , А	$m$ , кг
VMS1143	Varian of Canada	2,7	3	2,8	—	—	—
SFD356	Varian	2,85...3,91	2	2,2	58	90	39
SFD383	Varian	2,25...5,4	1	1	38	65	26
SFD303	Varian	9,33...9,4	1	1	34,5	65	21
MCV1300	Thomson – CSF	8,5...9,6	0,2	0,2	23	27,5	6
L7208	Litton	15,8...17,2	0,1	0,1	20	20	6,4
QKH1663	Raytheon	32,1...33,1	0,07	0,06	18	3,6	5,9

### 1.3. МАГНЕТРОНИ БЕЗПЕРЕРВНОГО РЕЖИМУ

Магнетрони безперервного режиму застосовуються для НВЧ нагрівальної апаратури промислового і побутового призначення, а також у бортовій радіотехнічній апаратурі навігації, пошуку і спостереження. За

рубежем випускається більш 80 типів цих магнетронів, причому близько 70% з них призначено для НВЧ нагрівання.

З великим успіхом вони застосовуються в харчовій промисловості для стерилізації, збереження свіжості і готування харчових продуктів, у медицині для діатермії, у виробництві пластмас, а також для сушіння деяких матеріалів і продуктів (наприклад, деревини, фоторезисту й ін.). Особливо масове застосування зазначені магнетрони одержали в побутових НВЧ печах, виробництво яких щорічно збільшується в зв'язку зі зростаючим попитом населення. НВЧ печі стали популярними серед населення тому, що вони забезпечують скорочення часу готування їжі, економію електричної енергії і можливість використання щодо дешевих заморожених продуктів.

Магнетрони безперервного режиму, по оцінках закордонних фахівців, є найбільш придатними джерелами НВЧ енергії для побутових печей, тому що вони найбільш компактні, економічні, надійні і мають найменшу вартість виготовлення. Ці переваги магнетронів зберігаються і при використанні для цих цілей твердотілих джерел НВЧ енергії особливо по ККД і вартості. Технічний рівень магнетронів безперервного режиму характеризується наступними даними.

**Частота і потужність.** Магнетрони безперервного режиму випускаються для роботи на  $f=0,35\ldots 10,5$  ГГц. Найбільше число типів цих магнетронів створено на частоти 0,915 і 2,45 ГГц, виділені відповідно до міжнародної угоди для НВЧ нагрівання.

Довгий час найбільша потужність магнетронів для НВЧ нагрівання складав 25 кВт. В останні роки  $P_{\text{вих}}$  цих приладів була значно підвищена. Спочатку японською фірмою NJRC був розроблений магнетрон типу M1265 із  $P_{\text{вих}}=60$  кВт, а потім канадськими фірмами Atomic Energy of Canada Ltd. і

Varian Ass. of Canada Ltd. був створений магнетрон у цьому ж діапазоні частот із  $P_{вих}=100$  кВт (табл. 1.4). Отримана потужність не є граничною. На думку канадських фахівців, на базі розробленої ними конструкції можна підвищити  $P_{вих}$  цих магнетронів до 250 кВт.

**Таблиця 1.4**

**Параметри магнетронів безперервного режиму для НВЧ нагрівання**

Тип приладу	Фірма-виготовлювач	$f$ , ГГц	$P_{вих}$ кВт	$\eta$ , %	$U_a$ , кВ	$I_a$ , А	$m$ , кг
<b>Для промислового НВЧ нагрівання</b>							
M1265	New Japan Radio	0,915	60	71	20	4,25	30
8684	RCA	0,915	30	69	14,5	3,0	10
YJ1191	Amperex Electronic	2,45	6	65	7,5	1,25	5
<b>Для побутових НВЧ печей</b>							
2M53	Toshiba	2,45	0,8	70	4,5	0,35	1,7
2M69	Toshiba	2,45	1,5	60	2,5	1,0	2,7
L5260A	Litton	2,45	0,8	70	3,5	0,4	1,35
YJ1500	Amperex Electronic	2,45	1,1	72	4,0	0,38	—
2M71	Hitachi	2,45	0,88	65	4,0	0,35	2,0

У магнетронів, призначених для радіотехнічної апаратури, максимальна  $P_{вих}=200$  Вт на частотах 0,35...2,5 ГГц і  $P_{вих}=300$  Вт на частоті 10 ГГц. У магнетронів для побутових печей на  $f=2,45$  ГГц типова  $P_{вих}=600...800$  Вт.

**КСХ.** Відмінною рисою магнетронів, призначених для НВЧ нагрівання, є їхня робота на неузгоджене навантаження. Це пояснюється тим, що НВЧ характеристики оброблюваних матеріалів і продуктів істотно змінюються в часі під впливом високочастотної енергії. Максимально припустимі КСХ навантаження для більшості магнетронів при живленні від нестабілізованого випрямлювача знаходяться в межах від 4 (при тривалій роботі) до 8...10 (при

короткочасних впливах). При живленні від випрямлювача з фільтрацією можлива стабільна робота магнетрона при КСХ навантаження, що досягають 8...10, а при живленні від мережі змінного струму зі значними пульсаціями напруги припустимий КСХ навантаження зменшується до 2...4.

**ККД.** Найбільші ККД досягнуті в потужних магнетронах, призначених для НВЧ нагрівання. Більшість цих магнетронів мають  $\text{ККД} \approx 70\%$ . В окремих типів магнетронів дециметрового діапазону  $\text{ККД} \approx 78...80\%$  (табл. 1.4).

**Довговічність.** Підвищення довговічності генераторів НВЧ є однієї з ключових проблем здешевлення НВЧ енергії. За останні 5 років фірми США і Японії (Litton, Toshiba, Hitachi) підвищили термін служби магнетронів безперервного режиму з 500 до 2000 годин. До 1975 р., гарантійний термін служби магнетронів при використанні в побутових НВЧ печах з обліком щоденного триразового включення складав 2...5 років. В даний час прогнозований термін служби зазначених НВЧ печей при використанні окремих типів магнетронів (наприклад, L5260A і 2M71) складає 10 років, тобто наближається до довговічності звичайних газових і електричних плит.

Параметри окремих типів магнетронів для промислового нагрівання і побутових НВЧ печей приведені в табл. 1.4. Серед магнетронів, призначених для побутових НВЧ печей, найбільш розповсюдженим у Європі, США і Японії є магнетрон типу 2M53. Він випускається японською фірмою Toshiba у великих кількостях (близько 200 тис. шт. у рік) і є самим дешевим магнетроном для НВЧ печей. Серед американських магнетронів слід зазначити магнетрон типу L5260A, що випускається фірмою Litton. Цей магнетрон разом з магнітною системою і фільтром має  $m=1,35$  кг. Його габаритні розміри не перевищують 114x127x123 мм. Магнетрони для промислового нагрівання в більшості випадків мають зовнішню магнітну

систему на постійних магнітах чи електромагнітах і систему примусового рідинного чи повітряного охолодження.

Для захисту від перевантажень у цих магнетронах застосовують зовнішні чи вбудовані НВЧ ізолятори у виді трьохплічних ферритових циркуляторів з водяним навантаженням, а для зниження паразитного випромінювання — вбудовані катодні НВЧ фільтри. У надпотужних магнетронах приймаються додаткові заходи по підвищенню електричної міцності керамічного вікна виходу НВЧ енергії і по його охолодженню. Для цієї мети використовують кераміку з підвищеною теплопровідністю і систему охолодження вікна за допомогою теплових трубок.

Магнетрони для побутових печей випускаються в основному з вбудованою магнітною системою на постійних магнітах, мають прямонакальний катод з вольфраму з малою тепловою інерцією і радіатор для природного чи примусового повітряного охолодження. У більшості цих магнетронів з метою запобігання витоку високочастотної енергії через катодну ніжку застосовують вбудовані катодні НВЧ фільтри.

Магнетрон МА8000 для побутових НВЧ печей працює на  $f=2,455$  ГГц із  $P_{вих}=600$  Вт у безперервному режимі, випускається японською фірмою Sanyo Electric, має дуже малі габаритні розміри і  $m \approx 1$  кг.

Прикладом конструктивного оформлення генераторів, призначених для промислового НВЧ нагрівання, є магнетрон F1123, що випускається фірмою Thomson-CSF. Магнетрон F1123 при роботі, на фіксованій частоті в межах  $2,43...2,47$  ГГц має  $P_{вих}=5$  кВт при  $U_a=5,2$  кВ і  $I_a=1,6$  А. Його маса складає 6,5 кг.

## 1.4. МІТРОНИ

Серед НВЧ приладів магнетронного типу особливе місце займають мітрони, робоча частота яких перебудовується зміною анодної напруги. Електронна перебудова частоти в цих приладах забезпечується за допомогою систем, що сповільнюють, зі слабо вираженими резонансними властивостями. У якості таких систем застосовуються зустрічні штирі, розташовані навколо катода по утворюючої циліндра. Мітрони в порівнянні з іншими видами НВЧ генераторів мають лінійну залежність частоти від керуючого напруги і меншу нерівномірність амплітудно-частотної характеристики. Завдяки зазначеним достоїнствам ці прилади одержали досить широке застосування в різній радіоелектронній апаратурі. В даний час мітрони успішно застосовуються як гетеродини прийомних пристроїв, свіп-генераторів у панорамних вимірювальних приладах і перебудовуючих генераторів в апаратурі радіопротидії. Мітрони з підвищеною вихідною потужністю використовуються в передавальних пристроях радіопідричників, альтиметрах, вимірювальних генераторах, як збудників могутніх НВЧ приладів, а також у передавачах станцій загороджувальних перешкод і в апаратурі зв'язку.

За кордоном випускається більш 170 типів мітронів на різні робочі частоти і потужності, призначених винятково для роботи в безперервному режимі. Останнім часом відзначається значне скорочення розробок і виробництва мітронів малої потужності, пов'язане з розширенням випуску твердотілих НВЧ приладів, що цілком заміняють малопотужні електровакуумні прилади, у тому числі й мітрони. Технічний рівень мітронів характеризується наступними даними.

**Частота і потужність.** Існуючі мітрони працюють у діапазоні частот 0,2...11 ГГц; більшість мітронів розрахована на роботу в діапазоні  $f=2...4$  ГГц. Вихідна потужність мітронів складає 10 мВт...500 Вт. За потужністю прилади цього типу можна умовно розділити на три групи: малопотужні, середньої потужності і потужні. Малопотужні мітрони з  $P_{\text{вих}}=10$  мВт...1Вт працюють у діапазоні частот 0,2...11 ГГц. Найбільш розповсюдженими є мітрони середньої потужності (1...10 Вт), що працюють у діапазоні частот 0,4...7 ГГц.

Мітрони з  $P_{\text{вих}} > 10$  Вт відносяться до числа потужних. Самим потужним серед відомих приладів цього типу є мітрон 500S2,9-3,1, що випускається фірмою Micron. Максимальна потужність мітронів складає 100 Вт на  $f=10$  ГГц, 500 Вт на  $f=3$  ГГц і 100 Вт на  $f=10$  ГГц. Не так давно фірмою Micron був розроблений мітрон типу 500S 2,45 із  $P_{\text{вих}}=500$  Вт на  $f=2,45$  ГГц, призначений для використання в побутових НВЧ печах. Завдяки можливості безперервного свіпирування частоти вдається зменшити «холодні області» в оброблюваному продукті. Параметри мітронів приведені в табл. 1.5 і 1.6.

**Таблиця 1.5**

**Основні параметри малопотужних мітронів**

Тип приладу	Фірма- виготовлювач	$f$ , ГГц	$P_{\text{вих}}$ , Вт	$U_{\text{ам}}$ , кВ	$I_a$ , мА
0,25P0,35-1S	Micron	0,35...1	0,25	2,4	5
0,25PL0,4-1,2S	Micron	0,4...1,2	0,25	2,4	5
0,5PL0,5-1,5S	Micron	0,5...1,5	0,5	2,4	10
0,5LS1-3S	Micron	1...3	0,5	2,4	10
EM1332	Varian	2...3	0,1	2	10
Z5360	General Electric	2,8...3,5	0,1	2	10
Z5429	General Electric	8,5...11	0,01	2	30



Таблиця 1.6

## Основні параметри потужних мітронів

Тип приладу	Фірма- виготовлювач	$f$ , ГГц	$P_{вих}$ , Вт	$\eta$ , %	$U_{ам}$ , кВ	$I_a$ , мА
ZM6231	General Electric	1,22...1,45	90	55	3,4	70
100S2,5-3	Mictron	2,5...3	100	60	3,6	80
BLM1341	Varian	2,6...3,05	90	—	2,9	70
500S2,9-3,1	Mictron	2,9...3,1	500	72	—	—
100S3-3,5	Mictron	3...3,5	100	60	3,5	70
ZM6246	General Electric	4,8...5,3	75	55	3,2	70
50X8,5-9,5	Mictron	8,5...9,5	50	45	4,5	55
80X9-9,5	Mictron	9,0...9,5	80	48	4,2	70

**Перебудова частоти.** Відношення максимальної частоти до мінімальної у мітронів складає 1,05...3,0. Найбільше значення відноситься до мітронів малої потужності. З ростом частоти і потужності діапазон перебудови скорочується. Зокрема, для мітронів середньої потужності цей коефіцієнт дорівнює 2, а для потужних мітронів 1,5 і менше.

Настроювальна характеристика мітронів близька до лінійної. Типове відхилення реальної частотної характеристики від лінійної у всьому діапазоні перебудови не перевищує  $\pm 1\%$ , а в більш вузькому діапазоні перебудови не більш  $\pm 0,5\%$ . Крутість перебудови в залежності від робочого діапазону частот 0,2...10 МГц/В. Найбільше значення відноситься до мітронів 3-см діапазону. Ці значення істотно менші, ніж у ЛЗХ О-типу, тому для керування частотою мітрона вимагаються менш потужні модулятори.

Мітрони мають також гарну повторюваність настроювальних характеристик, що при правильно обраних джерелах живлення оцінюється розкидом у межах  $\pm 0,1\%$ . Максимальна швидкість перебудови мітронів

досягає 20ГГц/мкс. Реалізація цієї швидкості залежить від можливостей і якості модуляторів напруги.

**Стабільність частоти** мітронів, як і інших НВЧ приладів з перебудовою частоти зміною робочої напруги, визначається головним чином стабільністю джерела живлення. Створення такого джерела живлення для мітрона простіше, ніж для ЛЗХ О-типу, тому що крутість перебудови мітрона майже на порядок менше. Частотна нестабільність при роботі зі звичайним джерелом живлення складає 1%, а при застосуванні стабілізованих джерел вона може бути зменшена до 0,06 %. При необхідності подальшого підвищення стабільності частоти застосовують схеми зі зворотним зв'язком або способи синхронізації частоти від зовнішнього генератора. Амплітудні шуми мітронів, виміряні при зсуві від робочої частоти на 30 і 60 МГц, складають 90 дБ/МГц (для широкодіапазонних мітронів) і 100дБ/МГц (для вузькодіапазонних). Інтегральні шуми в смузі частот 100кГц...100МГц приблизно на 65 дБ нижче рівня коливань на несущій частоті.

Якщо раніше відзначалося, що створення мітронів з малими шумами, порівнянними із шумами ЛЗХ і відбивними клістродами, є нерозв'язною задачею, то зараз відомо багато промислових типів мітронів з малими шумами. До них відносяться, наприклад, мітрони ZM6223 і ZM6201, що випускаються фірмою General Electric. У першого типу мітрона при  $P_{\text{вих}}=1$  Вт амплітудні шуми складають 135 дБ/Гц, у другого при  $P_{\text{вих}}=1,35$  Вт — 155 дБ/Гц.

**ККД.** Найбільші ККД мають потужні мітрони (45...72%). В окремих лабораторних зразках  $\eta=78...80\%$ . Малопотужні мітрони характеризуються порівняно невеликими значеннями ККД, що складають 5...15%.

**Міцність.** Мітрони завдяки малим розмірам і твердій конструкції володіють високою механічною міцністю і є дуже стійкими до впливу інших експлуатаційних факторів. Вони успішно витримують механічні удари з прискоренням вище 1000 g, вібрацію з прискоренням 20g і граничною частотою 2000 Гц. Крім того, вони стійко працюють при  $T_{\text{окр}} = -55...+125^{\circ}\text{C}$ , при опроміненні нейтронами з інтенсивністю  $2,55 \cdot 10^8$  рад/с і гамма-променями з інтенсивністю  $1,68 \cdot 10^7$  рад/с.

**Маса.** Мітрони в залежності від потужності і робочої частоти мають різні габаритні розміри і масу. Загальний об'єм, займаний мітронами, складає  $150...600 \text{ см}^3$ , а їхня маса  $0,25...3,5$  кг. Значні успіхи в мініатюризації мітронів досягнуті останнім часом завдяки застосуванню магнітних сплавів з високою магнітною енергією. Це дозволило створити магнітоекранірованні мітрони і довести їхній об'єм до  $150...200 \text{ см}^3$ .

Серед мініатюрних мітронів заслуговує уваги мітрон фірми Micron. Він розрахований на роботу в діапазоні  $f=0,5...1,0$  ГГц при зміні  $U_a$  в межах 250...500 В. Маса цього мітрона не перевищує 0,25 кг. Застосування мініатюрних, магнітоекранірованих і низьковольтних мітронів забезпечує щільне компонування апаратури і зменшує її загальну масу. Магнітоекраніровані мітрони нечутливі до зовнішніх магнітних полів до  $30 \cdot 10^{-4}$  Тл.

**Довговічність.** Гарантійний термін служби мітронів залежить від вихідної потужності і складає 500...1000 годин. Найменше значення відноситься до потужних мітронів. Однак фактичний термін служби мітронів набагато перевищує гарантійні значення. Як показали досліди, проведені фірмою General Electric, фактичний термін служби мітронів з  $P_{\text{вих}}=1...3$  Вт перевищує 5 тисяч годин, а мітронів із  $P_{\text{вих}}=7...10$  Вт складає 3 тисяч годин. Потужні мітрони з  $P_{\text{вих}} \approx 100$  Вт мають термін служби 500...1000 год. Мітрони

останнім часом стали застосовуватися не тільки для генерації монохроматичних коливань, але і у якості генераторів шуму. Перші повідомлення про створення прямошумового мітрона були опубліковані фірмою Micron у 1966 р. Подібні генератори розроблені на  $f=0,2...7$  ГГц із  $P_{вих}=0,25...2$  Вт.

Характеристики прямошумових мітронів приведені в табл.1.7. Прямошумові генератори на основі мітронів мають деякі достоїнства. Вони мають широкий діапазон електронної перебудови частоти, у якому шумові коливання можуть переміщатися з великою швидкістю. Зміною режиму роботи ці мітрони можуть переводитися в режим звичайних монохроматичних коливань. По інших експлуатаційних характеристиках (механічної міцності, габаритам, масі, живлячим напругам) вони не відрізняються від звичайних мітронів малої потужності.

**Таблиця 1.7**

**Характеристики лабораторних зразків прямошумових мітронів**

Характеристики	$f$ , ГГц			
	1,3	3,0	3,0	5,0
Діапазон електронної перебудови, МГц	300	2000	500	1000
Ширина смуги генерації шуму, МГц	До 30	150	100	—
Інтегральна вихідна потужність, Вт	0,25	0,25	До 2	—

У зв'язку з розвитком твердотілих НВЧ генераторів випуск малопотужних мітронів щорічно скорочується. Розробляються тільки мітрони з підвищеною вихідною потужністю. При цьому велика увага приділяється підвищенню ККД, поліпшенню частотної стабільності, розширенню діапазону електронної перебудови, скороченню габаритів і маси.

## 2. ТЕОРЕТИЧНА ЧАСТИНА

### 2.1. ФУНКЦІОНАЛЬНА СХЕМА ТА ПРИНЦИП ДІЇ БАГАТОРЕЗОНАТОРНОГО МАГНЕТРОНА.

Багаторезонаторний магнетрон — це генератор типу  $M$  із замкненим електронним потоком. Коливальна система багаторезонаторного магнетрону являє собою сповільнюючу систему (наприклад, типу щілина — отвір), замкнену саму на себе. Звичайно магнетрон працює в межах смуги пропускання сповільнюючої системи на стоячій хвилі і на частотах, які відповідають фазовому зсуву, кратному  $2\pi$ , по замкненому колу. Багаторезонаторні магнетрони належать до найбільш поширених типів потужних генераторів НВЧ. Перші багаторезонаторні магнетрони запропонували радянські інженери М. Ф. Алексеев та Д. Є. Маляров у 1938-1940 роках.

**Принцип дії багаторезонаторного магнетрона.** Магнетрон — це циліндричний діод, який розміщується у магнітному полі, напрямленому вздовж осі циліндра. Анод звичайно резонансної структури, катод має вигляд циліндра з емітуючою боковою поверхнею.

Магнетрон працює в режимі  $B > B_{кр}$ . Електрони, що вилітають з катода, якщо немає високочастотного поля, описують циклоїдні траєкторії. При збудженні високочастотних коливань в резонансній системі електрони взаємодіють з полем резонаторів. Анодну напругу  $U_a$  та магнітне поле  $B$  підбирають так, щоб рух електронів був синхронний із зміною фази високочастотного поля. Внаслідок цього відбувається групування електронів у згустки, які потрапляють у гальмуюче поле резонаторів. Такий тип взаємодії аналогічний до тривалої взаємодії в приладах біжучої хвилі. Тому коливання в багаторезонаторних магнетронах називають коливаннями типу біжучої хвилі. Але ніколи не слід забувати, що магнетрон фактично працює на стоячій хвилі, яка утворюється в ланцюжку замкнених самих на себе резонаторів, і тому магнетрону властива вузькосмуговість.

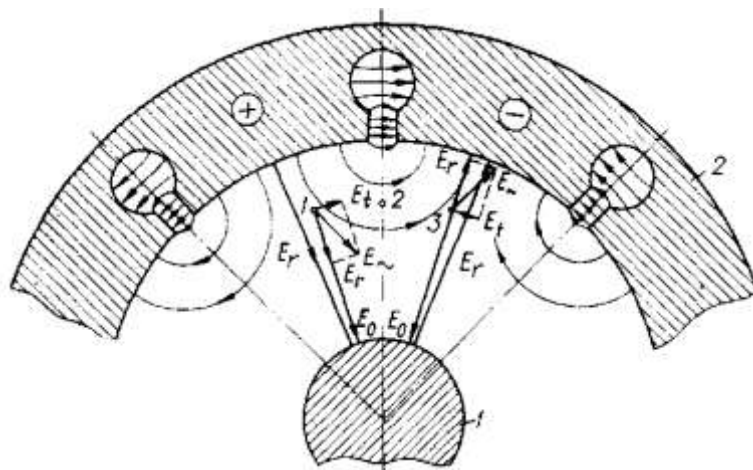
За умовою замкненості ланцюжка з  $N$  резонаторів повний зсув фаз по внутрішній поверхні анода повинен дорівнювати нулю або бути кратним  $2\pi$ :

$$\varphi N = 2\pi n, \quad n = 0, 1, 2 \dots$$

Напрошується висновок, що різниця фаз коливань в сусідніх резонаторах може набувати тільки дискретних значень, які визначаються співвідношенням:

$$\varphi = 2\pi n / N.$$

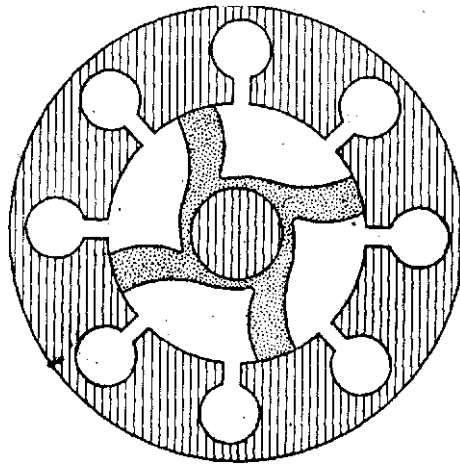
З усіх можливих коливань ( $n = 1, 2, 3, 4$ ) найбільше практичне значення має вид, при якому  $n = N/2$ , так званий  $\pi$ -вид, який можливий, якщо є парне число резонаторів  $N$ . У випадку  $\pi$ -виду виникають коливання, завдяки яким високочастотні поля в сусідніх резонаторах знаходяться у протифазах (рис. 2.1). Електронні згустки утворюються в гальмуючій фазі навколо електрона типу 2. Електрони типу 1, які вилітають з катода при додатній радіальній складовій змінного електричного поля, прискорюються і зміщуються до електрона типу 2:  $(E_{\Sigma} = E_0 + E_r)$ .



**Рис. 2.1. Структура високочастотного поля в просторі взаємодії циліндричного магнетрона**

Електрони типу 3, які починають рухатися при від'ємному значенні радіальної складової електричного високочастотного поля, гальмуються і також наближаються до електрона 2 ( $E_{\Sigma} = E_0 - E_r$ ). Таким чином, внаслідок групування електрони збираються в згустки, які мають вид спиць (рис. 2.2).

Спиці обертаються з постійною кутовою швидкістю синхронно із зміною фази високочастотного поля. Спиця завжди зустрічає гальмуюче поле в проміжку резонатора. При такій взаємодії електрони віддають свою енергію високочастотному полю протягом тривалого часу. Ефективній взаємодії електронів з полем сприяють, з одного боку, тривале перебування електронів у гальмуючому полі, а з другого, досить велика амплітуда поля в просторі взаємодії.



**Рис. 2.2. Спиці просторового заряду в магнетроні**

Як і для будь-якого приладу типу  $M$ , характерним у механізмі передачі енергії електронів високочастотному полю є зменшення потенціальної енергії електронів у процесі взаємодії. Потенціальна енергія зменшується в міру просування електронів до анода. Те, що електрони, віддаючи свою енергію поля, наближаються до анода, де поле ще більше і віддача енергії більш інтенсивна, також сприяє значному збільшенню к. к. д. магнетронів. К. к. д. магнетронів досягає 60% і навіть більше.

**Умова самозбудження магнетрона.** Поле в магнетроні пульсуюче і має характер стоячої хвилі. Максимальне поле буде в центрах проміжків; посередині між двома сусідніми проміжками (у вузлах стоячої хвилі) поле дорівнює нулю. Аналізуючи робочі процеси у магнетроні, треба дотримуватися концепції біжучої хвилі.

Розкладемо поле стоячої хвилі в просторі взаємодії на дві хвилі з однаковими швидкостями в протилежних напрямках. Для збудження коливань, як ми вже знаємо, треба, щоб електрон, рухаючись, завжди зустрічав гальмуючу фазу високочастотного електричного поля. Позначимо через  $t_1$  та  $t_2$  час проходження електроном центрів двох сусідніх проміжків резонатора. Тоді час, за який електрон переміститься між центрами сусідніх проміжків, дорівнюватиме:

$$t_2 - t_1 = \Delta t + pT,$$

де  $p=0, \pm 1, \pm 2 \dots$ . Різні знаки при  $p$  відповідають протилежним напрямкам руху електрона.

Різниця фаз коливань у сусідніх резонаторах  $\varphi = \omega \Delta t$ , або, як відомо,  $\varphi = 2\pi n/N$ , звідки  $\Delta t = 2\pi n/N\omega$ . Тому можна записати:

$$t_2 - t_1 = 2\pi n/N\omega + pT.$$

Швидкість, з якою повинен рухатись електрон, визначається формулою:

$$v = 2\pi r_c / N(t_2 - t_1) = \omega r_c / n + pN.$$

Якщо при цьому електрон завжди зустрічає однакову фазу поля, то можна вважати, що вздовж замкненого кільця резонаторів анодного блока біжить хвиля з фазовою швидкістю:

$$v_\phi = \omega r_c / n + pN.$$

Отже, на внутрішній поверхні анодного блока обертається в обидва боки багато вже відомих нам просторових гармонік, які відповідають різним значенням  $p$ .

Тепер перейдемо безпосередньо до викладу умови збудження коливань у магнетроні. Це умова синхронізму руху електронів у просторі взаємодії і фазової швидкості просторової гармоніки  $V_H = V_\phi$ . Вважатимемо, що основна маса електронів рухається посередині між анодом і катодом. Тому у вираз для фазової швидкості замість  $r_a$  підставимо середній радіус простору взаємодії:



$$r_{cp}=r_a+r_k.$$

Отже, середня фазова швидкість хвилі в просторі взаємодії:

$$v_{cp}=\omega(r_a+r_k)/2(n+pN).$$

Середня швидкість руху електронів у просторі взаємодії:

$$v_y=E/B.$$

Якщо вважати, що  $r_a/r_k \approx 1$ , напруженість поля можна визначити так:

$$E=U_0/(r_a-r_k).$$

Тоді

$$v_y=U_0/(r_a-r_k)B.$$

Умову самозбудження можна записати:

$$U_0/(r_a-r_k)B=\omega(r_a+r_k)/2(n+pN).$$

Звідси

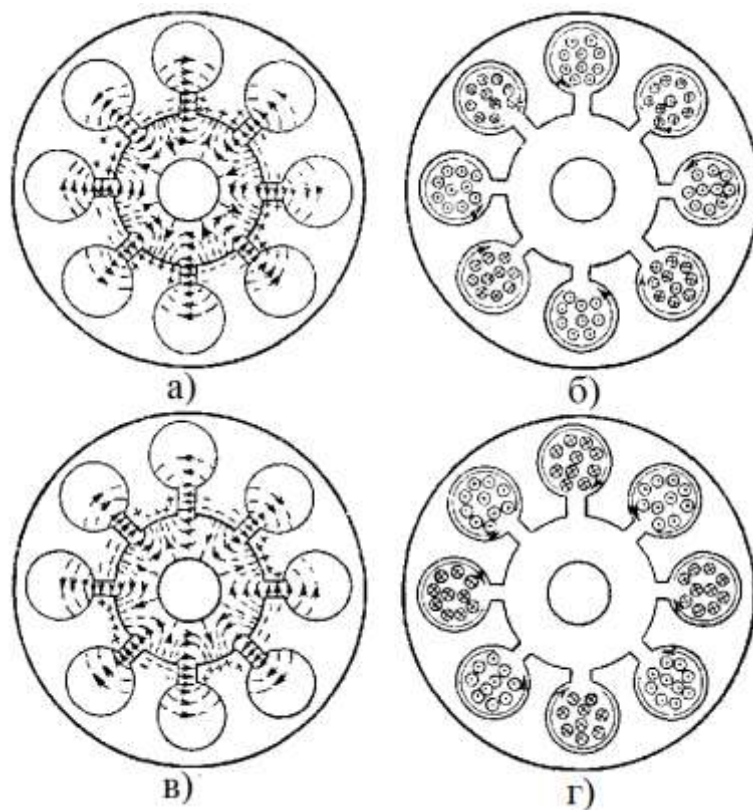
$$U_0=(\omega(r_a^2-r_k^2)/2(n+pN))B.$$

Згідно з останньою формулою анодне навантаження, при якому збуджуються коливання в магнетроні для кожного виду коливань  $n$  при фіксованому номері просторової гармоніки  $p$ , лінійно зв'язане з індукцією поля. На рис.2.3 побудовано графіки для чотирьох видів коливань восьмirezонаторного магнетрона. Умовам самозбудження відповідають ділянки прямих, які лежать за лінією критичного режиму. З рис. 2.3 видно, що для  $\pi$ -виду потрібна найменша анодна напруга  $U_a$ .

**Коливання  $\pi$ -виду.** Незважаючи на різноманіття конструктивних оформлень багаторезонаторного магнетрона, порожнина кожного резонатора завжди й обов'язково з'єднується щілиною з простором катод - анод і тому робоча поверхня анодного блоку (тобто поверхня, на яку попадають електрони, що вилетіли з катода) завжди розрізана на ряд сегментів, відділених друг від друга щілинами. Між цими сегментами при роботі магнетрона виникає перемінна напруга високої частоти.

Нормальна робота магнетрона характеризується тим, що високочастотні напруги сусідніх сегментів зрушені по фазі на  $180^\circ$ . Для

характеристики загальної картини розподілу перемінної напруги по сегментах анода можна сказати, привласнивши кожному сегменту порядковий номер, що в той момент часу, коли на парних сегментах напруга позитивна, на непарних сегментах воно негативно і навпаки. Такий тип коливань називається коливаннями  $\pi$ -виду. Цим терміном підкреслюють обставину, що фази напруг двох сусідніх сегментів зрушені на кут  $180^\circ$  чи  $\pi$  радіан. Картина розподілу зарядів і високочастотних полів анодного блоку при коливаннях  $\pi$ -виду показана на рис. 2.3.



**Рис. 2.3. Розподіл електричних і магнітних високочастотних полів у багаторезонаторному магнетроні. Електричне поле представлене пунктирними лініями, а магнітне— стрілками, перпендикулярними до площини креслення. Кожен малюнок зображує процеси, що відбуваються в магнетроні через  $1/4$  періода: а)  $t=0$ ; б)  $t=1/4T$ ; в)  $t=1/2T$ ; г)  $t=3/4T$ .**

**Коефіцієнт корисної дії магнетрона.** Складність процесів, які відбуваються в багаторезонаторному магнетроні, не дає змоги безпосередньо підрахувати вихідну потужність та к.к.д. магнетрона. Вихідна енергія визначається як різниця між повною потенціальною енергією, яку має

електрон на катоді, та кінетичною енергією, яку має електрон у момент удару об анод.

К. к. д. визначається як відношення:

$$\eta_e = W_{\Pi} - W_K / W_{\Pi}.$$

Потенціальна енергія електрона біля катода дорівнює  $eU_a$ .

Можна вважати, що «корисні» електрони в магнетроні рухаються приблизно по «статичній» циклоїді. Радіус кола де  $d$ - відстань між катодом та анодом:  $R = mE / eB^2 = mU_a / eB^2 d$ .

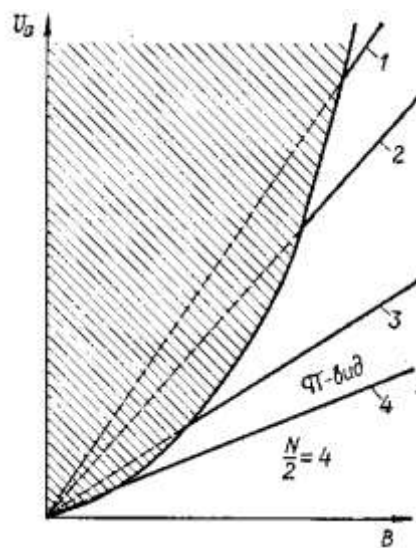


Рис. 2.4. Прямі самозбудження магнетрона типу біжучої хвилі при  $N=8$

Будемо виходити з найбільш несприятливих умов щодо к. к. д., коли удар електрона об анод відбувається у верхній точці циклоїдної траєкторії. При цьому швидкість електрона буде найбільшою. Центром обертання є точка дотику кола до поверхні, на якій відбувається перекочування до анода. Радіус обертання буде  $2R$ . Тоді при кутовій швидкості  $\omega_y$ :

$$v_{max} = \omega_y 2R = 2v_y = 2E/B = 2U_a / Bd.$$

Визначимо кінетичну енергію  $W_K$  при ударі електрона об анод:

$$W_K = mv_{max}^2 / 2 = 4mU_a^2 / 2B^2 d^2 = 2mU_a^2 / B^2 d^2.$$

Електронний к. к. д.:

$$\eta_e = W_{\Pi} - W_K / W_{\Pi} = 1 - U_a / B^2 2m / ed^2.$$

Або виразивши к. к. д. через критичні значення  $U_{акр}$  та  $B_{кр}$ , дістанемо:

$$\eta_e = 1 - (U_a/U_{a_{кр}})(B_{кр}/B)^2.$$

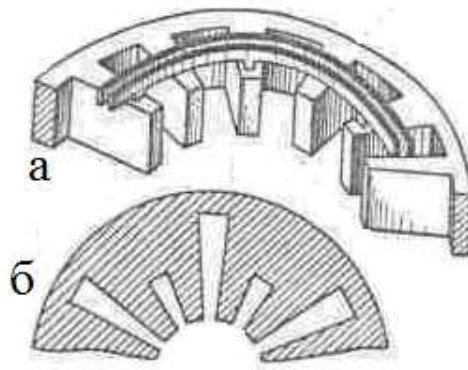
Отже, при  $U_a = U_{a_{кр}}$  та  $B = B_{кр}$  к.к.д. дорівнює нулю. Для механізму із великими значеннями к.к.д. треба вибирати  $B > B_{кр}$ .

**Конструкції багаторезонаторних магнетронів.** Багаторезонаторні магнетрони, як правило, виконуються з «внутрішнім» варіантом конструкції коливальної системи. Вся резонаторна система і значна частина виводу енергії містяться всередині вакуумної оболонки і становлять невід'ємну частину магнетрона.

Конструкції багаторезонаторних магнетронів можна класифікувати за типом резонаторної системи, способом з'єднання з магнітною системою, типом виводу енергії, методом механічного перестроювання частоти і способом охолодження.

Анодний блок магнетрона завжди має парну кількість резонаторів для забезпечення роботи на  $\pi$ -виді коливань. Робота магнетрона іноді супроводжується появою додаткових видів коливань або раптовою зміною частоти. Пояснюється це тим, що при малій дисперсії сповільнюючої системи коливання різних видів мало рознесені за частотою. При цьому збудження одного з видів коливань (наприклад,  $\pi$ -виду) може спричинити збудження коливань іншого виду, близького за частотою. Внаслідок цього основний вид коливань через зміну поля в просторі взаємодії може навіть зникнути. Все це призводить до раптової зміни частоти магнетрона. Є два методи усунення багаточастотності магнетронного генератора:

1. Сегменти анодного блока через один з'єднують короткими провідниками-зв'язками (рис.2.5,а). При збудженні коливань  $\pi$ -виду сегменти, до яких приєднано зв'язки, мають однаковий потенціал, струм по зв'язках не тече. Зв'язки, таким чином, приєднані до резонаторів паралельно, вони збільшують власну ємність резонаторів, що приводить до зниження робочої частоти коливань  $\pi$ -виду.



**Рис. 2.5. Резонаторні системи магнетронів біжучої хвилі:**  
**а) – система із зв'язками; б) – різнорезонаторна система**

З появою коливань інших видів між сегментами, до яких підімкнено зв'язки, виникне різниця потенціалів, і по зв'язках потече струм. У цьому разі зв'язка вже відіграє роль індуктивності, яка підмикається паралельно власній індуктивності резонатора. Зменшення еквівалентної індуктивності приводить до збільшення частоти коливань цього виду. Різниця в резонансних частотах для різних видів коливань збільшується і за рахунок ємності між зв'язками.

2. Використовуються різнорезонаторні коливальні системи, в яких резонансні частоти відповідно до розмірів резонаторів розпадаються на дві групи, в одній з яких є частота коливань  $\pi$ -виду (рис. 2.5, б). Інтервал між частотами збільшується із збільшенням різниці в розмірах резонаторів, але при цьому зменшується напруженість електричного поля НВЧ у просторі взаємодії.

Кількість резонаторів збільшується із збільшенням робочої частоти. Звичайно магнетрони 10-сантиметрового діапазону мають 8-12 резонаторів, 3-сантиметрового 12-18 резонаторів. З переходом до міліметрового діапазону їх кількість збільшується до 24-38 і більше. Взагалі, збільшення числа резонаторів сприяє зниженню анодної напруги при тій самій індукції магнітного поля. Різнорезонаторні системи широко використовуються на хвилях, коротших за 3 см.

Значно ефективніше розділяються коливання в коаксіальних магнетронах, де використовується коаксіальний резонатор, який охоплює

багаторезонаторний анодний блок. Внутрішнім провідником коаксіального резонатора є циліндрична поверхня власне анодного блока. Ця поверхня проріzana поздовжніми щілинами, що зв'язують коаксіальний резонатор з магнетронними резонаторами через один.

Збудження анодного блока відбувається на  $\pi$ -виді. Йому відповідає збудження коаксіального резонатора на хвилі  $H_{011}$ , при якій електричне поле і струм в стінках мають вигляд замкнених кіл. Інші види коливань коаксіального резонатора можна легко погасити. Коаксіальні магнетрони завдяки кращому поділу видів коливань дають змогу працювати при менших амплітудах високочастотного поля в просторі взаємодії, що приводить до підвищення к.к.д. Збільшення добротності коливальної системи коаксіального магнетрона забезпечує більш високу стабільність робочої частоти коливань.

За способом сполучення з магнітними системами магнетрони поділяються на непакетовані конструкції з зовнішньою магнітною системою та пакетовані, в яких магнітна система входить до будови самого магнетрона. У пакетованих конструкціях вдається значно зменшити магнітний проміжок і тим самим збільшити магнітне поле в просторі взаємодії. Більшість магнетронів, що працює на хвилях, коротших за 3 см, має пакетовані системи.

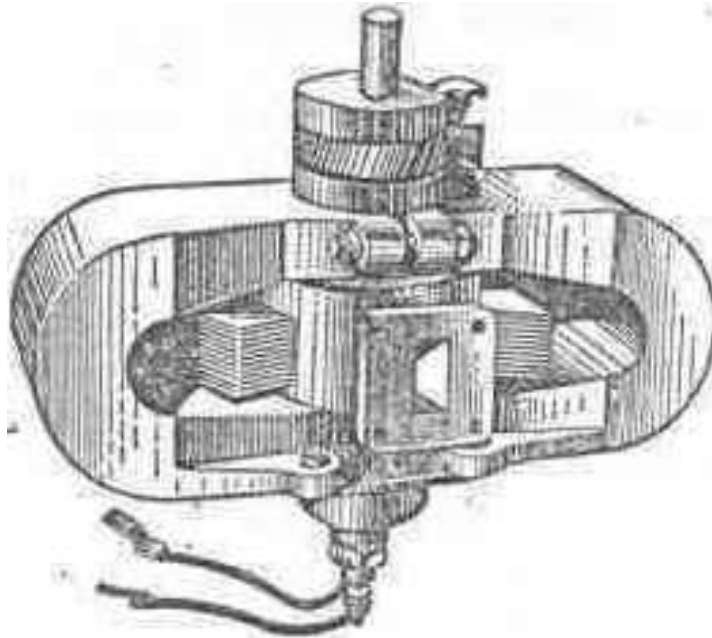
Індукція магнітного поля, як ми вже знаємо, залежить від робочого діапазону. На хвилях від 1 до 3 см вона дорівнює 0,6-0,8 Тл; від 8 до 10 см — 0,2-0,5 Тл, на більш довгих вона не перевищує 0,2 Тл.

Високочастотна енергія відбирається від магнетрона коаксіальними чи хвилевідними лініями або комбінаціями їх. Хвилевідні виводи мають керамічне вікно.

Механічне перестроювання частоти магнетронів звичайно виконується за допомогою стержнів, які вводяться в циліндричну порожнину резонаторів (ємнісне настроювання) або кілець, розміщених паралельно бічним поверхням анодного блоку (індуктивне настроювання).

Для охолодження на анодному блоці є радіатор, що обдувається потоком повітря. Більш потужні магнетрони мають системи охолодження рідиною.

Загальний вигляд магнетрона показано, на рис. 2.6.



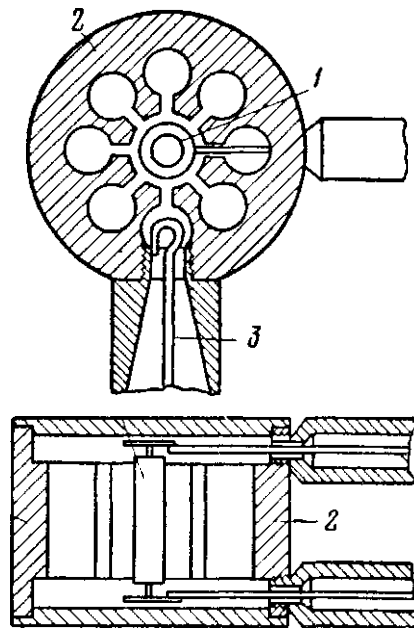
**Рис. 2.6. Загальний вигляд магнетрона 3-сантиметрового діапазону**

З конструктивної точки зору багаторезонаторний магнетрон складається з трьох основних частин (рис. 2.7): катода; анодного блоку, що містить коливальні контури; виводу високочастотної енергії.

Робоча поверхня катода розташовується строго коаксіально з робочою поверхнею анодного блоку. Діаметр катода складає значну частину (порядку 50%) діаметра робочої поверхні анодного блоку.

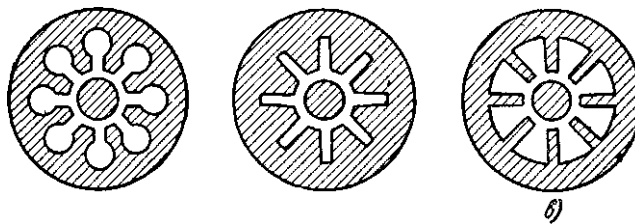
Найбільш характерною особливістю багаторезонаторного магнетрона є те, що в анодному блоці розташовується велика кількість (від 8 до 40) порожнин, що виконують роль коливальних контурів (резонаторів), що дало підставу, називати цей тип магнетронів «багаторезонаторним».

Форма резонаторів може бути дуже різноманітною, наприклад, щілина-отвір, сектор, щілина й ін. (рис. 2.8).



**Рис. 2.7. Основні частини магнетрона:**

**1 — катод; 2 — анодний блок; 3 — вивід високочастотної енергії**

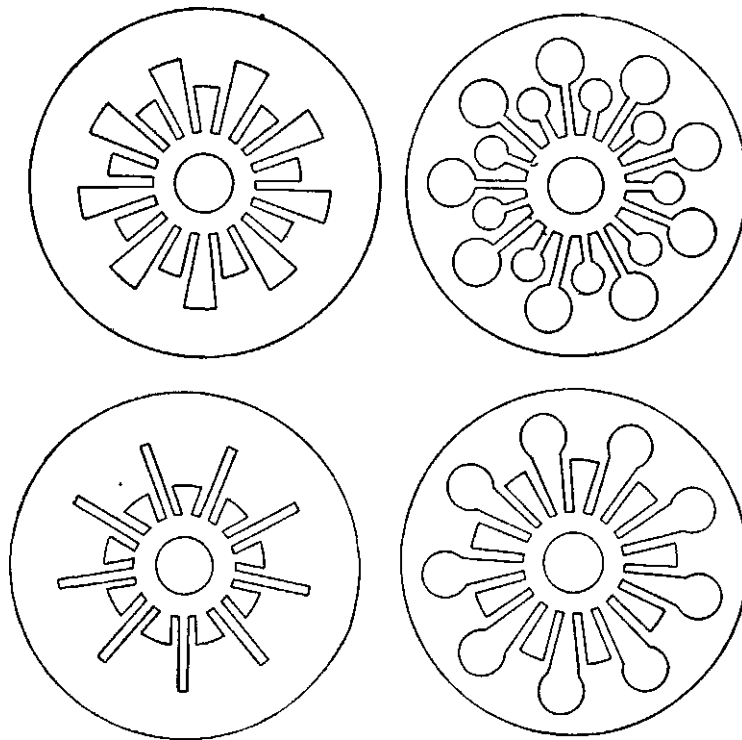


**Рис. 2.8. Типові форми резонаторів магнетрона:**

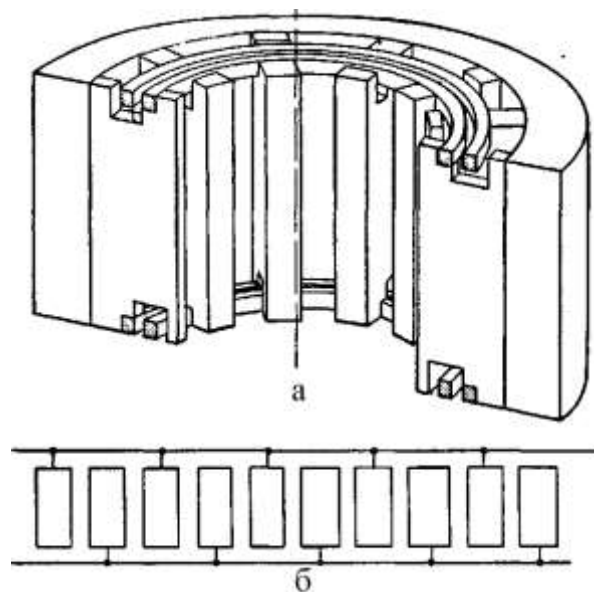
**а) щілина-отвір; б) щілина; в) сектор.**

При розробці багаторезонаторних магнетронів у них були експериментально виявлені «перехід» генеруємих коливань з однієї хвилі на іншу. Ці переходи викликалися як змінами режиму живлення, так і змінами високочастотного навантаження магнетрона. Для усунення цих небажаних у роботі переходів застосовують або «різнорезонаторні системи», у яких анодний блок містить резонатори двох типів, які послідовно чергуються (рис. 2.9), або анодні блоки з однаковими резонаторами, що електрично зв'язані між собою так званими «зв'язуваннями». Один з можливих видів «зв'язувань» представляє собою два металевих кільця, одне з яких з'єднує між собою всі парні сегменти анодного блоку, а інше — всі непарні сегменти. Конструкції зв'язок у багаторезонаторних магнетронах представлені на рис. 2.10.





**Рис. 2.9. Різрезонаторні блоки магнетронів: зверху з однотипними резонаторами; знизу з чергуванням резонаторів різних типів.**

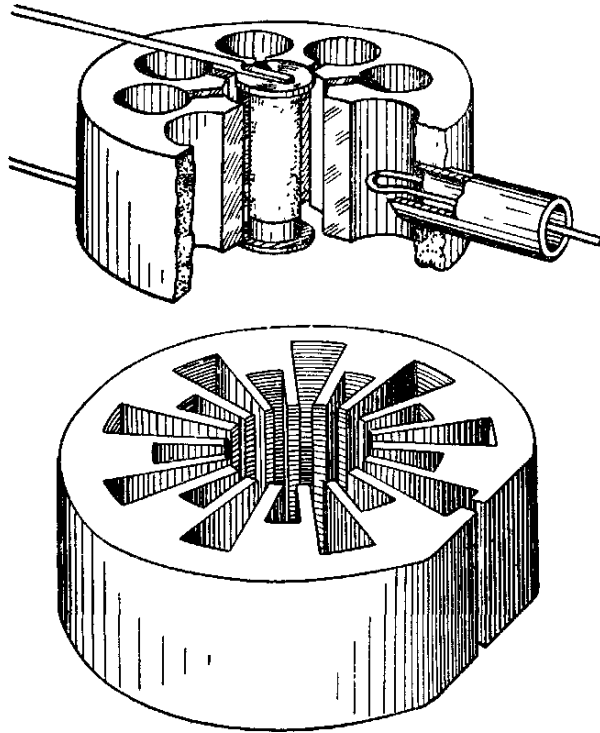


**Рис. 2.10. Конструкція зв'язок:**

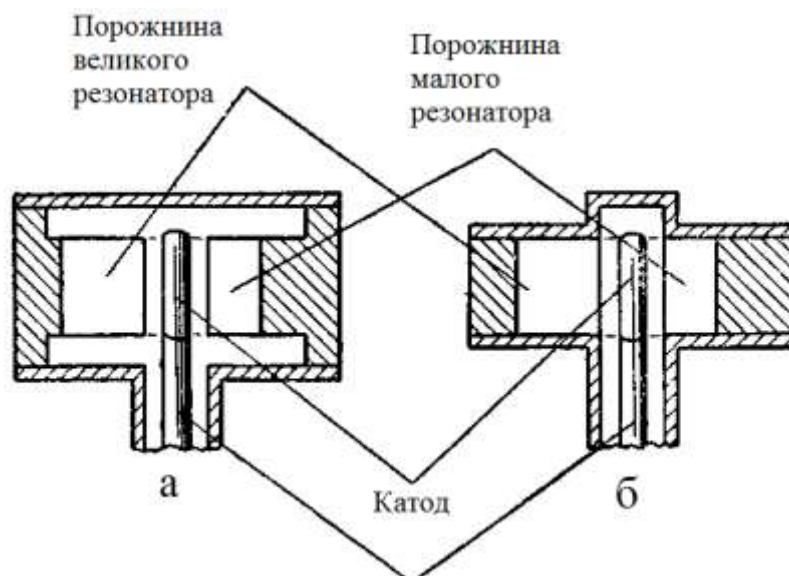
**а) загальний вид; б) схема з'єднань кілець (зв'язок) із сегментами**

Вихід високочастотної енергії в сучасних багаторезонаторних магнетронах робиться на коаксіальну лінію за допомогою петлі в одному з резонаторів, або на хвилевід за допомогою щілини в одному з резонаторів (рис. 2.11).

Порожнини резонаторів різноконтурних магнетронів можуть бути як відкритими зі сторони торцевих поверхонь анодного блоку, так і повністю закритими металом (рис. 2.12).



**Рис. 2.11. Вивід високочастотної енергії за допомогою петлі або щілини**



**Рис. 2.12. Різнорезонаторні анодні блоки магнетрона:**  
а) відкритий тип; б) закритий тип;

**Робочі та навантажувальні характеристики магнетронів.** Характеристики — це вольт-амперні характеристики:  $U_a=f(I_a)$ , їх параметри такі: магнітна індукція  $B$ , потужність  $P_{\sim}$ , частота коливань  $\omega$  і повний к.к.д.  $\eta_i$ . Ці характеристики звичайно будуються в прямокутній системі координат. По вертикальній осі відкладають сталу анодну напругу  $U_a$ , по горизонтальній - постійний анодний струм  $I_a$  (рис. 2.13).

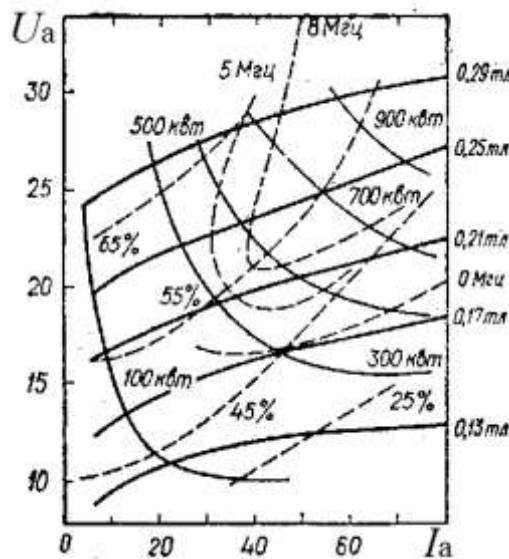
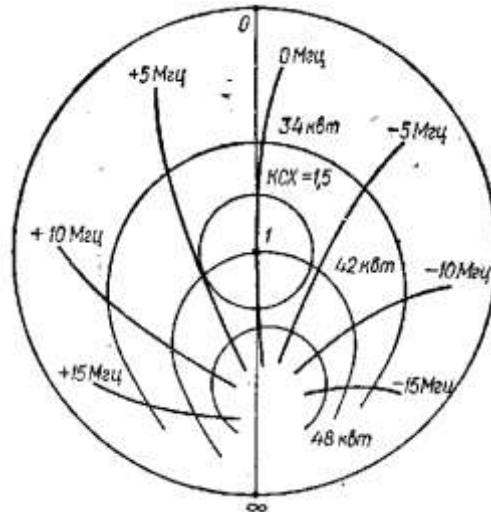


Рис. 2.13. Типові робочі характеристики магнетрона

Навантажувальні характеристики показують залежність вихідної потужності та частоти від повного опору (або повної провідності) навантаження. Характеристики  $P_{\sim}=f(Z_n)$  та  $\omega=f(Z_n)$  при  $I_a=\text{const}$  будують на комплексній поверхні повного опору навантаження у полярній системі координат (рис.2.14). Форма і хід наведених характеристик зумовлені фізичними процесами в магнетронах.

**Області використання магнетронів.** Висока ефективність, порівняно проста конструкція, висока надійність у роботі і невелика вартість - все це сприяє широкому використанню магнетронних генераторів. Основні області використання:

- передавачі імпульсних радіолокаційних станцій та маяків;
- генератори радіоперешкод;
- імпульсні генератори для живлення лінійних прискорювачів;
- генератори безперервного режиму для установок НВЧ нагрівання.



**Рис. 2.14. Типові навантажувальні характеристики магнетрона**

Для магнетронів більш вживаний імпульсний режим роботи. Імпульсні магнетрони випускають на довжини хвиль від 8 мм до 10 см з імпульсною потужністю від 10 кВт до 10 МВт, діапазон механічного перестроювання до 15%.

Магнетрони безперервної дії малої потужності (від 3 до 20 Вт) в 3-сантиметровому діапазоні випускаються для бортових та переносних наземних РЛС. Більш потужні магнетрони (до 3 кВт) працюють на хвилях, довших за 10 см і випускаються для ВЧ нагрівання в побуті; потужні магнетрони (до 30 кВт) в основному використовуються в промисловості також для НВЧ нагрівання. З кожним роком збільшується кількість коаксіальних магнетронів, які мають к.к.д., вищий за 60%, та високу стабільність частоти.

## 2.2. МЕТОДИКА РОЗРАХУНКУ РЕЗОНАТОРА ТИПУ ЩІЛИНА – ОТВІР

Найпростіший метод розрахунку резонаторів типу щілина–отвір (рис. 2.15) ґрунтується на розгляді кожного резонатора анодного блоку, як системи, що складається із зосередженої ємності і зосередженої індуктивності. Подумки підключаючи джерело змінної напруги до країв щілини, визначимо частоту, при якій струм  $I$  через джерело  $I=0$ .

Умова резонансу:

$$I = 0 = I_L + I_C = jU_1\omega C + \frac{U_1}{j\omega L}, \quad (2.1)$$

звідки маємо  $\omega^2 = \frac{1}{L_{(zn)}C_{(фарад)}}$  або  $\lambda_{(cm)} = 2\pi\sqrt{L_{(cm)}C_{(cm)}}$ . Таким чином, задача

зводиться до визначення  $L$  і  $C$ .

Для визначення  $L$  припустимо, що по внутрішній поверхні циліндричного отвору резонатора тече струм  $i_0$  (по годинниковій стрілці), а в сусідньому резонаторі такої ж сили струм тече в протилежному напрямку (проти годинникової стрілки). Для середнього значення магнітного поля  $H_{cp}$ , відповідно до закону Ампера, справедливе співвідношення:

$$H_{cp}l_{cp} = 4\pi 2i_0.$$

Середню довжину шляху обходу  $l_{cp}$  навколо стінки, що розділяє резонатори (рис. 2.15), прийmemo рівній середній довжині магнітної силової лінії, без обліку товщини стінки, тобто:

$$l_{cp} = 2h + d.$$

Тоді

$$H_{cp} = \frac{8\pi i_0}{2h + d}.$$

Магнітний потік, що пронизує циліндричний отвір резонатора:

$$\Phi_{\text{ц}} = H_{\text{ср}} S = H_{\text{ср}} \frac{\pi d^2}{4}.$$

Крім цієї частини магнітного потоку у резонаторі має місце ще магнітний потік, зосереджений у щілині резонатора ( $S_{\text{щ}} = lW$ ). Припускаючи, що уздовж щілини магнітне поле рівномірно падає від  $H_{\text{ср}}$  до нуля, отримаємо

$$\Phi_{\text{щ}} = \frac{H_{\text{ср}}}{2} S_{\text{щ}} = \frac{H_{\text{ср}}}{2} lW.$$

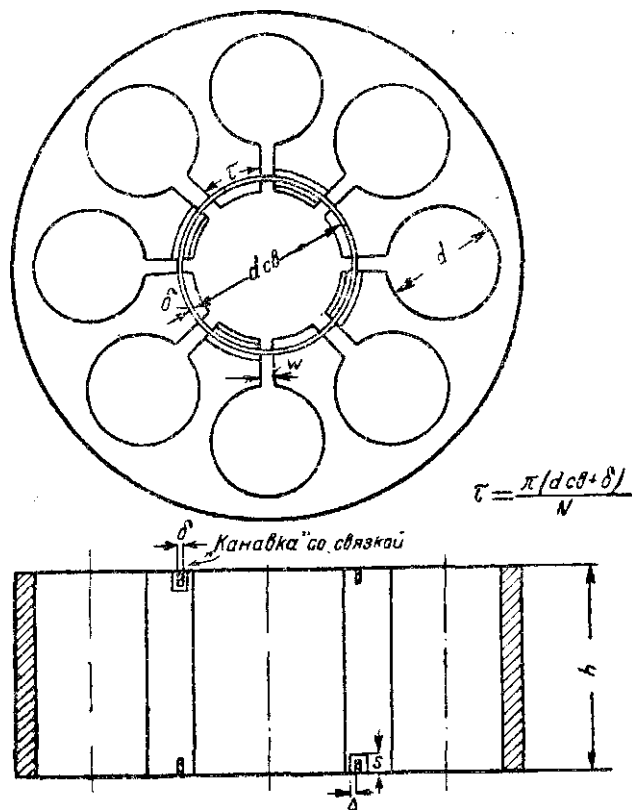


Рис. 2.15. Магнетронні резонатори типу щілина – отвір із двосторонніми одинарними кільцями зв'язку

По визначенню поняття «індуктивність»  $L = \frac{\Phi}{i_0}$ , тому:

$$L = \frac{\Phi_{\text{ц}} + \Phi_{\text{щ}}}{i_0} = \frac{H_{\text{ср}}}{i_0} \left( \frac{\pi d^2}{4} + \frac{lW}{2} \right) = \frac{8\pi}{2h+d} \left( \frac{\pi d^2}{4} + \frac{lW}{2} \right) \quad (2.2)$$

Перейдемо до визначення ємності резонатора  $C$ . Зосереджена ємність резонатора утворюється чотирма частинами його.

По-перше, частина ємності  $C_{щ}$  обумовлена стінками щілини. Цю ємність можна обчислити по формулі плоского конденсатора:

$$C_{щ} = \frac{lh}{4\pi W} . \quad (2.3)$$

По-друге, частина ємності обумовлена торцевими краями анода, пов'язаними із щілиною:

$$C_T = \frac{h}{4\pi^2} \ln \frac{d}{W} . \quad (2.4)$$

По-третє, частина ємності обумовлена тією частиною стінок циліндричного отвору, що прилягає до щілини. Цю ємність ми визначимо так, щоб при скороченні до нуля всіх інших ємностей власна довжина хвилі циліндричної порожнини з розрізом прагнула до подвійного периметра циліндра тобто:

$$\lambda = 2\pi\sqrt{L_{щ}C_{щ}} = 2\pi d .$$

Підставляючи замість  $L_{щ}$  його значення, одержуємо:

$$C_{щ} = \frac{d^2}{L_{щ}} = \frac{d^2(2h+d)4}{8\pi \cdot \pi d^2} = \frac{1}{\pi^2} \left( h + \frac{d}{2} \right) . \quad (2.5)$$

По-четверте, частина ємності обумовлена кільцями зв'язку. При одинарних двосторонніх кільцях зв'язку (рис. 2.15) ємність  $C_{св.од}$  обумовлена тільки тією ділянкою кільця зв'язку, що проходить над торцевою стінкою резонатора. Цю ємність ми обчислимо по формулі плоского конденсатора, приймаючи величину площі конденсатора рівною добутку товщини стінки  $\tau$  на довжину  $p_{cp}$  середньої лінії зазору між кільцями зв'язку і стінками «канавки»:

$$C_{св.од} = \frac{S}{4\pi\Delta} = \frac{\tau p_{cp}}{4\pi\Delta} = \frac{\tau(2s + \delta + 2\Delta)}{4\pi\Delta} . \quad (2.6)$$

У випадку подвійних зв'язувань ця ємність подвоюється і до неї додається ємність  $C_{доб}$  між ділянками кілець, що знаходяться над щілиною. Цю додаткову ємність ми також визначимо по формулі плоского конденсатора:

$$C_{доб} = \frac{W \cdot s}{4\pi\Delta} . \quad (2.7)$$

Тому ємність, яка обумовлена подвійними кільцями зв'язку, дорівнює:

$$C_{св.дв.} = 2C_{св.од.} + 2C_{доб} = \frac{2\tau(2s + \delta + 2\Delta)}{4\pi\Delta} + \frac{2Ws}{4\pi\Delta} .$$

Підставляючи знайдені значення  $L$ ,  $C_{ц}$ ,  $C_T$ ,  $C_{ц}$ ,  $C_{св}$  у формулу для довжини хвилі, одержуємо:

$$\lambda = 2\pi \sqrt{\frac{8\pi}{2h+d} \left( \frac{\pi d^2}{4} + \frac{lW}{2} \right) \left\{ \frac{h}{4\pi} \left[ \frac{l}{W} + \frac{1}{\pi} \ln \frac{d}{W} + \frac{4}{\pi} \left( 1 + \frac{d}{2h} \right) \right] + C_{св} \right\}} ,$$

де  $C_{св}$  – ємність кілець зв'язку.

Для магнетронів без кілець зв'язку  $C_{св} = 0$ . Для магнетронів з одинарними кільцями зв'язку  $C_{св} = \frac{\tau(2s + \delta + 2\Delta)}{4\pi\Delta}$ . Для магнетронів з подвійними кільцями зв'язку  $C_{св} = \frac{\tau(2s + \delta + 2\Delta)}{2\pi\Delta} + \frac{Ws}{2\pi\Delta}$ .

При визначенні ємності і довжини хвилі прийнято ряд припущень. Кільцевий анодний блок замінений лінійним, ємність між торцевою поверхнею блоку і катодом не врахована, крайовий ефект і вплив торцевих кришок магнетрона не врахована, досить складна конфігурація поля замінена спрощеною і т.д. Єдиним виправданням усіх цих допущень є їхня фізична ясність і математична простота. Придатність цієї формули може вирішити практика. Розбіжність теоретичних розрахунків і експериментальних складає 20...30 %.



### 2.3. МЕТОДИКА РОЗРАХУНКУ РЕЗОНАТОРА СЕКТОРНОГО ТИПУ

Одна з найбільш розповсюджених форм анодного блоку сучасних магнетронів показана на рис. 2.16. Профіль резонатора такого типу легко асоціюється із сектором, у якого вилучена вершина і нагадує за формою лопатку. Тому будемо називати такі резонатори секторного типу. При розрахунку цих резонаторів ми будемо розглядати кожен резонатор як відрізок секторної лінії, замкнутий накоротко на одному кінці і навантажений на ємність на іншому кінці. Ємність, на яку навантажена лінія, складається з ємності між торцями резонатора і ємності, внесеної кільцями зв'язку.

Для розрахунку резонансної частоти ми подумки підключаємо до «щілини» резонатора джерело напруги  $U_1 \sin \omega t$  і відшукуємо ту частоту, при якій струм через джерело дорівнює нулю. Через джерело проходять два струми: струми секторної лінії  $I_l$  і струм ємності  $I_c$ . Тому умовою резонансу є співвідношення

$$I = 0 = I_c + I_l .$$

Для рішення задачі нам необхідно визначити струм  $I_l$ , що йде в лінію. Розглянемо ділянку секторної лінії шириною  $h$  і довжиною  $dr$ , що знаходиться на відстані  $r$  від центра сектора лінії. Так само, як у будь-якій довгій лінії, зменшення сили струму і напруги на цій ділянці лінії визначається наступним чином:

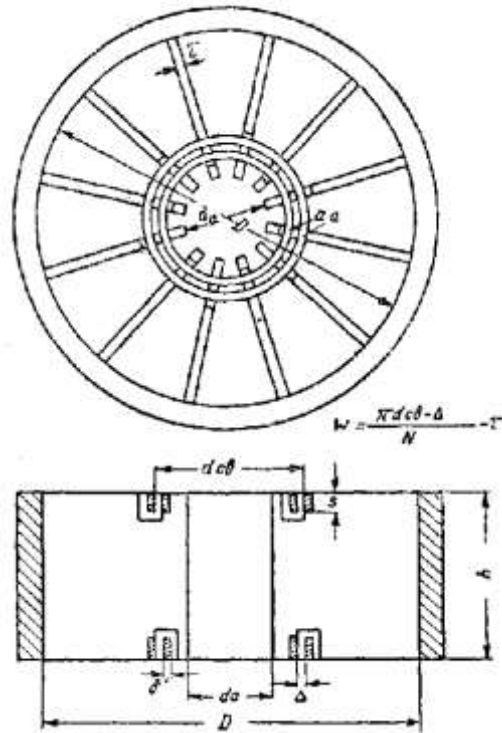
$$dI = -jU\omega dC ;$$

$$dU = -jI\omega dL .$$

Визначимо величини  $dC$  і  $dL$  для секторної лінії. Величину ємності  $dC$  визначимо по формулі плоского конденсатора:

$$dC = \frac{hdr}{4\pi\psi r \cdot 9 \cdot 10^{11}} (\Phi) ,$$

де  $\psi$  – кут розкриття сектора.



**Рис. 2.16. Магнетронні резонатори секторного типу  
з двосторонніми подвійними кільцями зв'язку**

За законом Ампера напруженість магнітного поля в будь-якій точці розглянутої ділянки дорівнює  $H = \frac{4\pi i}{h}$ .

По визначенню поняття індуктивності:

$$dL = \frac{\Phi}{I} = \frac{4\pi\psi r dr}{10^9 h} (\Gamma_H) .$$

Підставляючи знайдені значення  $dC$  і  $dL$  у формули, що визначають зменшення струму і напруги, отримуємо:

$$\frac{dI}{dr} = - \frac{jUkh}{120\pi\psi r}; \quad (2.8)$$

$$\frac{dU}{dr} = -jI \frac{120\pi\psi r}{h} . \quad (2.9)$$

Диференціюючи по  $r$  перше рівняння і підставляючи в нього значення  $\frac{dU}{dr}$  з іншого, отримуємо:

$$\frac{1}{r} \frac{d}{dr} \left( r \frac{dI}{dr} \right) + k^2 I = 0 . \quad (2.10)$$

Загальне рішення цього рівняння:

$$I = AJ_0(kr) + BN_0(kr). \quad (2.11)$$

Диференціюючи це рівняння по  $r$  і підставляючи знайдене значення  $\frac{dI}{dr}$  в рівняння (2.8), отримуємо:

$$U = \frac{j120\pi\psi r}{h} [AJ_1(kr) + BN_1(kr)]. \quad (2.12)$$

Рівняння (2.11) і (2.12) є основними рівняннями для рішення будь-яких задач, зв'язаних із секторною лінією. Перейдемо до визначення сили струму на початку лінії.

Граничні умови (при  $r=b$ ,  $U=0$  і при  $r=a$ ,  $U=U_l$ ) дають можливість визначити постійні інтегрування  $A$  і  $B$  і знайти силу струму на початку лінії (при  $r=a$ , рис. 2.17):

$$I_n = \frac{-jU_l h}{120\pi\psi a} Ct(ka, kb), \quad (2.13)$$

де 
$$Ct(ka, kb) = \frac{J_0(ka)N_1(kb) - N_0(ka)J_1(kb)}{J_1(kb)N_1(ka) - J_1(ka)N_1(kb)}.$$

Функція  $Ct(ka, kb)$  називається великим радіальним котангенсом. Струм  $I_c$ , що протікає через зосереджену ємність, дорівнює:  $I_c = jU_l \omega C = \frac{jU_l kC}{30}$ .

Тому умова резонансу  $I_c + I_n = 0$  дає

$$\frac{jU_l kC}{30} = \frac{jU_l h Ct(ka, kb)}{120\pi\psi a}.$$

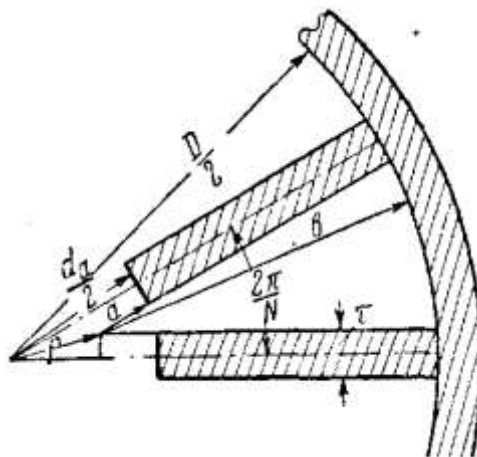
В анодному блоці магнетрона всі резонатори рівні між собою. Отже, кут розкриття сектора  $\psi = \frac{2\pi}{N}$ , де  $N$  – число резонаторів. Тому умову резонансу можна записати у вигляді

$$\frac{8\pi^2 aC}{Nh} = \frac{Ct(ka, kb)}{k}. \quad (2.14)$$

Ця формула є основною для розрахунку довжини хвилі.

Зосереджена ємність  $C = C_T + C_{cs}$  складається з ємності кілець зв'язку  $C_{cs}$  і торцевої ємності  $C_T = \frac{h}{4\pi^2} \ln \frac{\pi d_a}{\pi d_a - N\tau}$ , для якої в попередньому розділі були отримані наступні формули: при відсутності кілець зв'язку  $C_{cs} = 0$ , при

двосторонніх одинарних кільцях зв'язку  $C_{св} = \frac{\tau(2s + \delta + 2\Delta)}{4\pi\Delta}$ , при подвійних двосторонніх кільцях зв'язку  $C_{св} = \frac{\tau(2s + \delta + 2\Delta)}{2\pi\Delta} + \frac{Ws}{2\pi\Delta}$ .



**Рис. 2.17. Позначення розмірів, прийняте при розрахунку резонаторів секторного типу**

Перш ніж переходити до прикладів практичного розрахунку резонаторів цього типу, варто зробити зауваження про величини  $a$  і  $b$ . У конструктивних кресленнях магнетронів звичайно вказують діаметр анода  $d_a$  і діаметр  $D$  окружності, що збігається з задніми стінками резонаторів. Якщо прийняти  $a = \frac{d_a}{2}$ ;  $b = \frac{D}{2}$  (рис. 2.17), то практично виходить дуже велика помилка.

Величини  $a$  і  $b$  варто розраховувати більш точно. З рис. 2.17 видно, що:

$$\frac{\tau}{2\rho} = \sin \frac{2\pi}{2N} \text{ і тоді } \rho = \frac{\tau}{2 \sin \frac{\pi}{N}}; \quad (2.15)$$

$$a = \frac{d_a}{2} - \rho; \quad b = \frac{D}{2} - \rho \quad (2.16)$$

Питання про придатність цього методу для розрахунку реальних магнетронів, так само як і питання про придатність будь-якого методу, може вирішити тільки практика. Розбіжність теоретичних розрахунків і експериментальних складає 20 – 25 %.

## **2.4. МЕТОДИКА ІНЖЕНЕРНОГО РОЗРАХУНКУ ЕЛЕКТРИЧНОГО РЕЖИМУ І ПРОСТОРУ ВЗАЄМОДІЇ ЕЛЕКТРОННОГО ПОТОКУ З ЕЛЕКТРОМАГНІТНИМ ПОЛЕМ РЕЗОНАТОРА МАГНЕТРОНА**

Для спрощення математичного аналізу руху електронів в магнетроні необхідно прийняти ряд припущень, які не призводять до значних розбіжностей між теоретичними розрахунками та результатами експериментальних досліджень:

1. Нехтуємо краєвими ефектами і розштовхувальними діями об'ємного заряду в напрямку осі магнетрона, що дає можливість звести тривимірну задачу до двовірної, тобто прийняти рух електронів в площині, яка перпендикулярна до осі катода, і положення електрона визначається лише двома координатами.

2. Нехтуємо неоднорідністю постійного (у часі) електричного поля, яка викликається наявністю зазорів в анодному блоці. Це дає можливість в полярній системі координат прийняти постійне електричне поле залежним лише від радіусу і незалежним від кута.

3. Нехтуємо магнітним полем в результаті кругових електричних струмів в просторі катод-анод, тобто напруженість магнітного поля приймаємо постійною і незалежною від радіуса.

4. Нехтуємо вторинною електронною емісією і відбиттям електронів від поверхні катода і анода.

5. Нехтуємо початковими швидкостями електронів при виході електронів із катода, залежністю маси електронів від швидкості, впливом високочастотного магнітного поля на рух електронів.

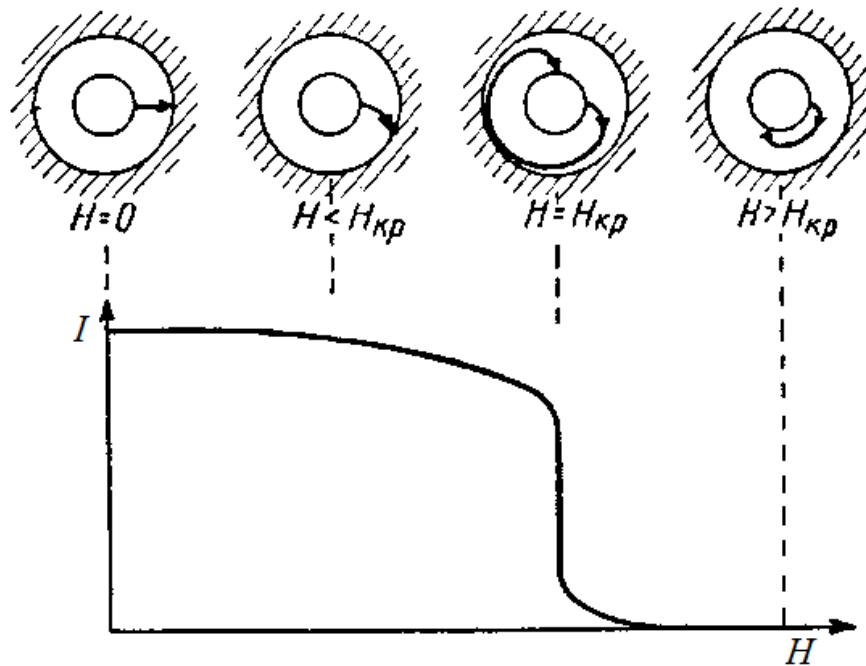
6. Приймаємо ідеальну циліндричність і коаксіальність робочих поверхней катода і анода.

### 2.4.1. ПОРАБОЛА КРИТИЧНОГО РЕЖИМУ

Парабола критичного режиму магнетрона описується співвідношенням:

$$H = \frac{6,72\sqrt{U_a}}{r_a \left[ 1 - \left( \frac{r_k}{r_a} \right)^2 \right]}, \quad (2.17)$$

де  $H$  – напруженість магнітного поля в ерстедах;  $U_a$  – анодна напруга в вольтах;  $r_a$  і  $r_k$  – радіуси анода і катода в сантиметрах.



**Рис. 2.18. Траєкторії електронів і значення анодного струму магнетрона в статичному режимі при постійній анодній напрузі**

На рис. 2.18 зображені траєкторії електронів і значення анодного струму магнетрона в статичному режимі при постійній анодній напрузі.

На рис. 2.19...2.30 зображені теоретичні параболи критичного режиму магнетрона.

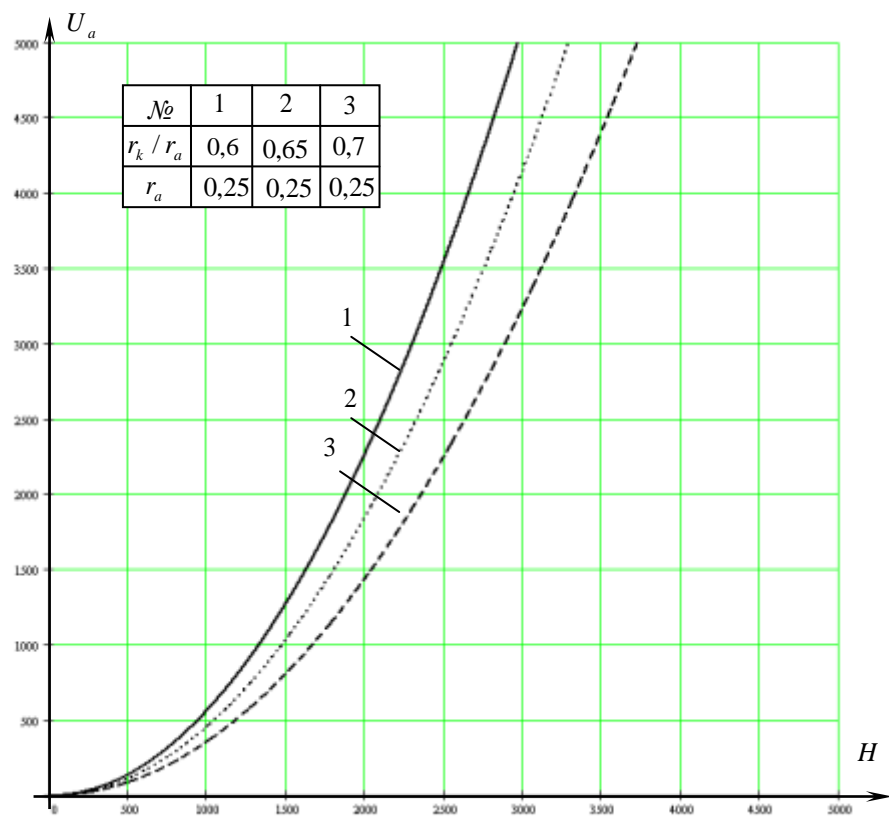


Рис. 2.19. Параболы критического режима магнетрону при  $r_a = 0,25\text{см}$

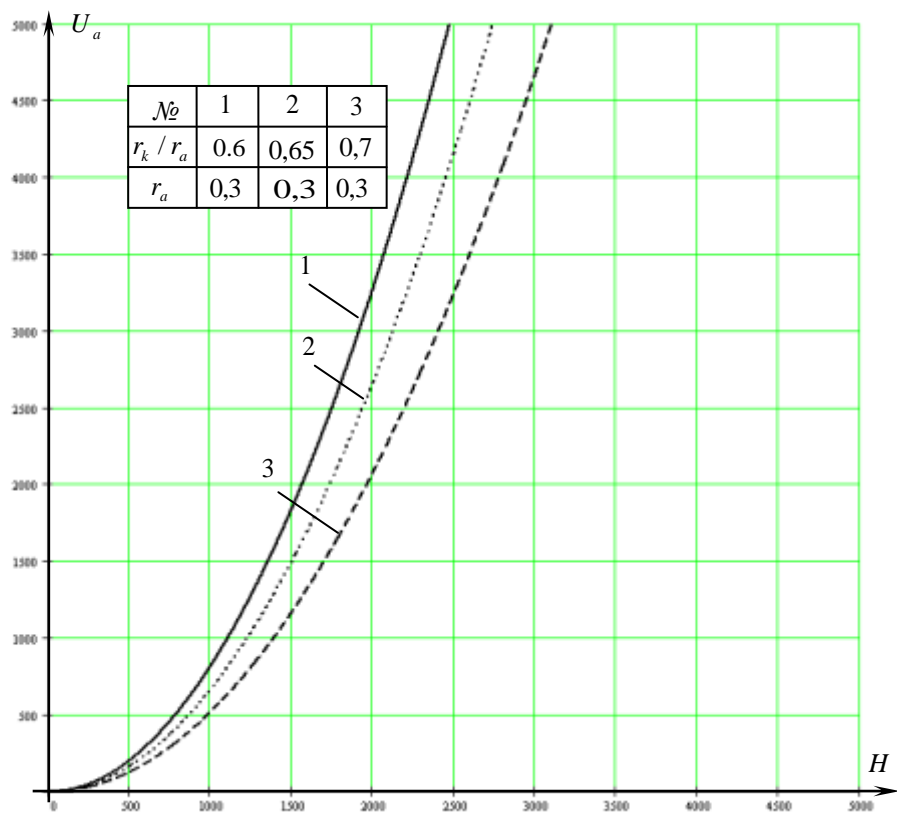


Рис. 2.20. Параболы критического режима магнетрону при  $r_a = 0,30\text{см}$

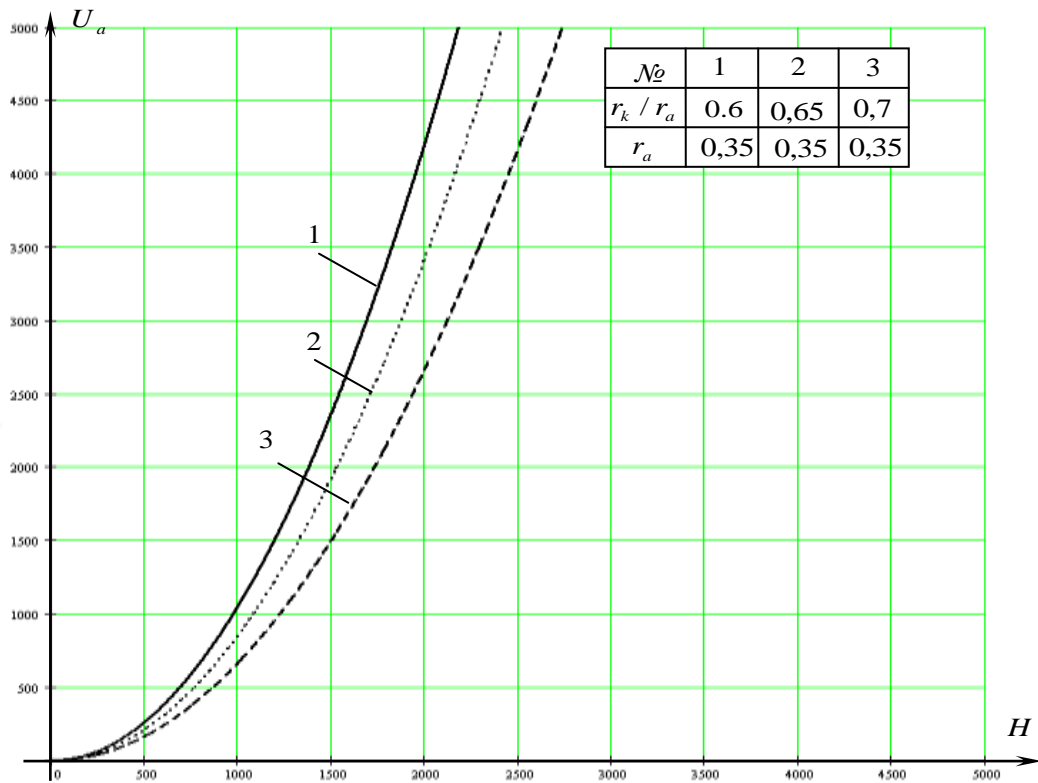


Рис. 2.21. Параболи критичного режиму магнетрона при  $r_a = 0,35\text{см}$

Плавне зменшення анодного струму при збільшенні напруженості магнітного поля відбувається до тих пір, поки кут між траєкторією електрона і поверхнею анода не прийме нульове значення. В цей момент через магнетрон проходить струм  $I \approx \frac{3}{4}I_0$ , де  $I_0$  – струм при відсутності магнітного поля. Подальше збільшення  $H$  викликає “відрив” траєкторії електронів від поверхні анода і різке зменшення анодного струму від  $\frac{3}{4}I_0$  до 0. В реальних магнетронах в критичному режимі струм змінюється повільніше.

В неробочій області параболи критичного режиму коливання не виникають, тому що електрони попадають на анод при проходженні першої половини своєї петлі і не можуть передавати енергію електромагнітному полю. Практичне значення параболи критичного режиму – при заданих значеннях  $r_a$ ,  $r_k$  і  $H$  можна розрахувати значення анодної напруги  $U_a$ , при збільшенні якої магнетрон не зможе функціонувати як генератор електромагнітних коливань.



### 2.4.2. ПОТЕНЦІАЛ СИНХРОНІЗАЦІЇ

Умовою роботи магнетрона є синхронізація руху прольоту електронів від зазору до зазору за половину періода електромагнітних коливань, тобто  $V_{\tau} = \frac{2l}{T}$ , де  $l$  – період розміщення зазорів вздовж поверхні анода;  $T = \frac{\lambda}{c}$  період електромагнітних коливань;  $\lambda$  – довжина електромагнітних коливань;  $c$  – швидкість світла.

Період  $l$  знаходиться згідно формули

$$l = \frac{2\pi r}{N},$$

де  $r$  – радіус уявного кола;  $N$  – число резонаторів. Тоді

$$V_{\tau} = \frac{4\pi r c}{N\lambda}.$$

Потенціальне складове швидкості біля поверхні анода набуває максимального значення  $V_c$  – швидкості синхронізації

$$V_c = \frac{4\pi c r_a}{N\lambda}.$$

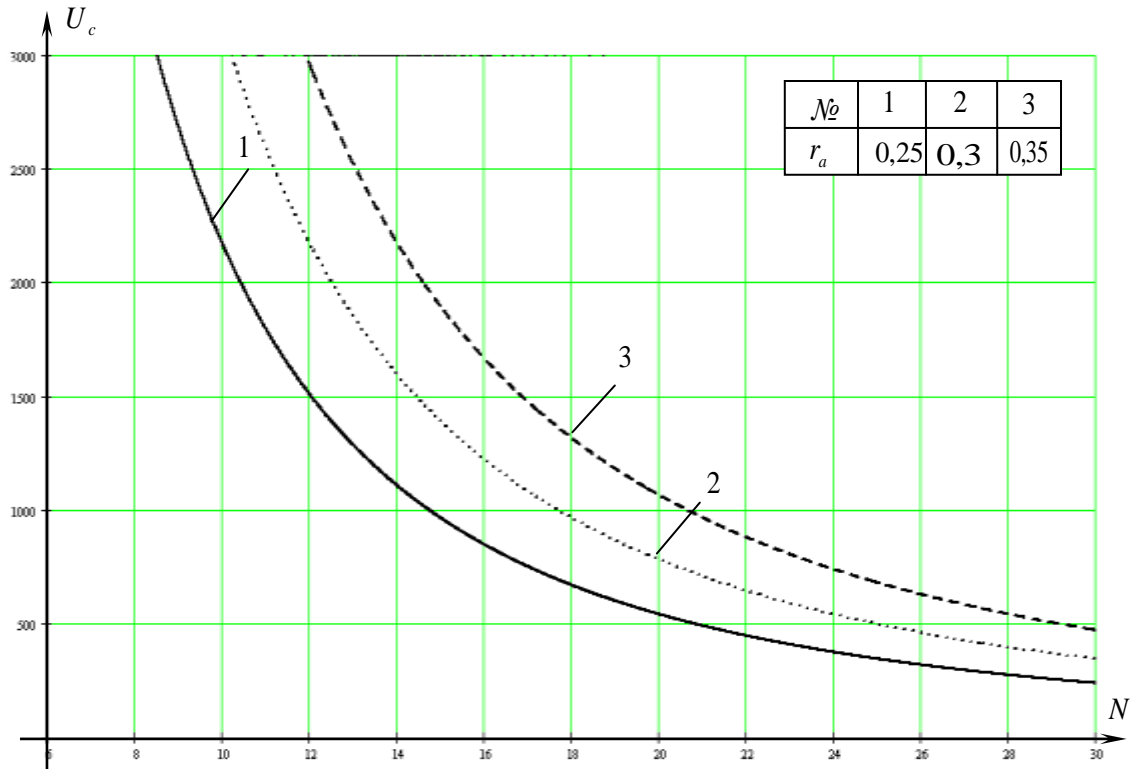
І тоді, приймаючи  $V = 5,96 \cdot 10^7 \sqrt{U}$ , можна знайти напругу синхронізації:

$$U_c = 4,04 \cdot 10^7 \left( \frac{r_a}{N\lambda} \right)^2.$$

На рис. 2.22 зображені теоретичні залежності для потенціалу синхронізації від числа резонаторів.

З фізичної точки зору потенціал синхронізації  $U_c$  представляє собою тангенціальну складову кінетичної енергії електронів біля аноду, яка забезпечує синхронізм. При  $U_a < U_c$  магнетрон не може функціонувати, тому що енергії, яку електрони одержують від джерела анодної напруги, недостатньо для забезпечення швидкості, яка необхідна для синхронізації. Тому на площині  $H$  і  $U_a$  область, яка лежить нижче лінії  $U = U_c$  є неробочою

областю, тому що в ній анодна напруга недостатня для забезпечення руху електронів синхронно з рухом гальмівного високочастотного поля. Тому що кінетична енергія електронів біля анода не може бути менша  $eU_c$ , то і втрати потужності в багаторезонаторному магнетроні не можуть бути менші  $I_a U_c$ .



**Рис. 2.22. Теоретична залежність потенціала синхронізації від числа резонаторів при радіусах анода  $r_a = 0,25; 0,30; 0,35 \text{ см}$**

З фізичної точки зору потенціал синхронізації  $U_c$  представляє собою тангенціальну складову кінетичної енергії електронів біля аноду, яка забезпечує синхронізм. При  $U_a < U_c$  магнетрон не може функціонувати, тому що енергії, яку електрони одержують від джерела анодної напруги, недостатньо для забезпечення швидкості, яка необхідна для синхронізації. Тому на площині  $H$  і  $U_a$  область, яка лежить нижче лінії  $U = U_c$  є неробочою областю, тому що в ній анодна напруга недостатня для забезпечення руху електронів синхронно з рухом гальмівного високочастотного поля. Тому що кінетична енергія електронів біля анода не може бути менша  $eU_c$ , то і втрати потужності в багаторезонаторному магнетроні не можуть бути менші  $I_a U_c$ .

### 2.4.3. ПОРОГОВА НАПРУГА

Порогова напруга – мінімальне значення анодної напруги, при якій електрони можуть попадати на анод, визначається співвідношенням

$$U_n = \frac{1884 \cdot H}{N\lambda} (r_a^2 - r_k^2) - 4,04 \cdot 10^7 \left( \frac{r_a}{N\lambda} \right)^2. \quad (2.18)$$

На рис. 2.23...2.27 зображені теоретичні лінії порогової напруги  $U_n$  в залежності від напруженості магнітного поля  $H$ . Лінія порогової напруги дотикається параболи критичного режиму в точці  $U_a = U_c$ .

Порівняння розрахованих значень порогових напруг з експериментальними результатами показують, що, як правило, магнетрони продовжують генерувати електромагнітні коливання і при напругах  $U_a \geq 0,9U_n$ , де  $U_n$  – порогова напруга, розрахована по формулі (2.18), тобто похибка формули близько 10%. Співвідношення (2.18) призводить до похибки близько 10%, тому що враховує дію на електрон в радіальному напрямку лише трьох сил: електричної, магнітної і центробіжної.

Якщо врахувати ще циклоїдальний характер руху електронів, то формула для порогової напруги приймає вигляд:

$$U_n = \frac{1884 \cdot H}{N\lambda} (r_a^2 - r_k^2) - \frac{16,16 \cdot 10^7 r_a^2}{N^2 \lambda^2 \left[ 1 + \frac{21300}{N\lambda H} \right]^2}, \quad (2.19)$$

А співвідношення для робочої напруги в цьому випадку:

$$U_a = \frac{1884 \cdot H}{N\lambda} (r_a^2 - r_k^2) - \frac{8,08 \cdot 10^7 r_a^2}{N^2 \lambda^2 \left[ 1 + \frac{21300}{N\lambda H} \right]^2} + \left[ \frac{2900 \cdot I_a N H (r_a - r_k)^4}{\sqrt{U_a} h r_a^2} \right]^{\frac{2}{3}}, \quad (2.20)$$

де  $h$  – висота анодного блоку [см];  $I_a$  – анодний струм [А].

Збільшення робочої напруги із збільшенням струму  $I_a$  пояснюється тим, що силові електричні лінії, які пов'язані з електронами, створюють додаткове електричне поле, яке і призводить до росту робочої анодної напруги.

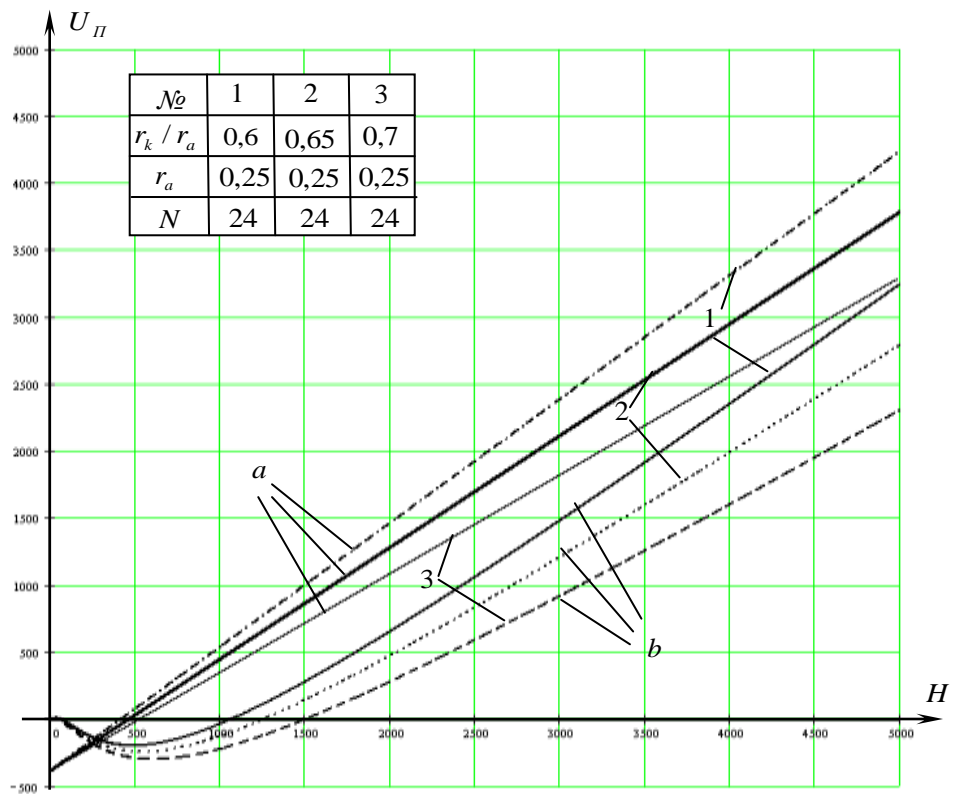


Рис. 2.23. Теоретична залежність порогової напруги магнетрона без урахування (а) та з урахуванням (б) циклоїдального характеру руху електронів при  $r_a = 0,25\text{см}$  і  $N = 24$

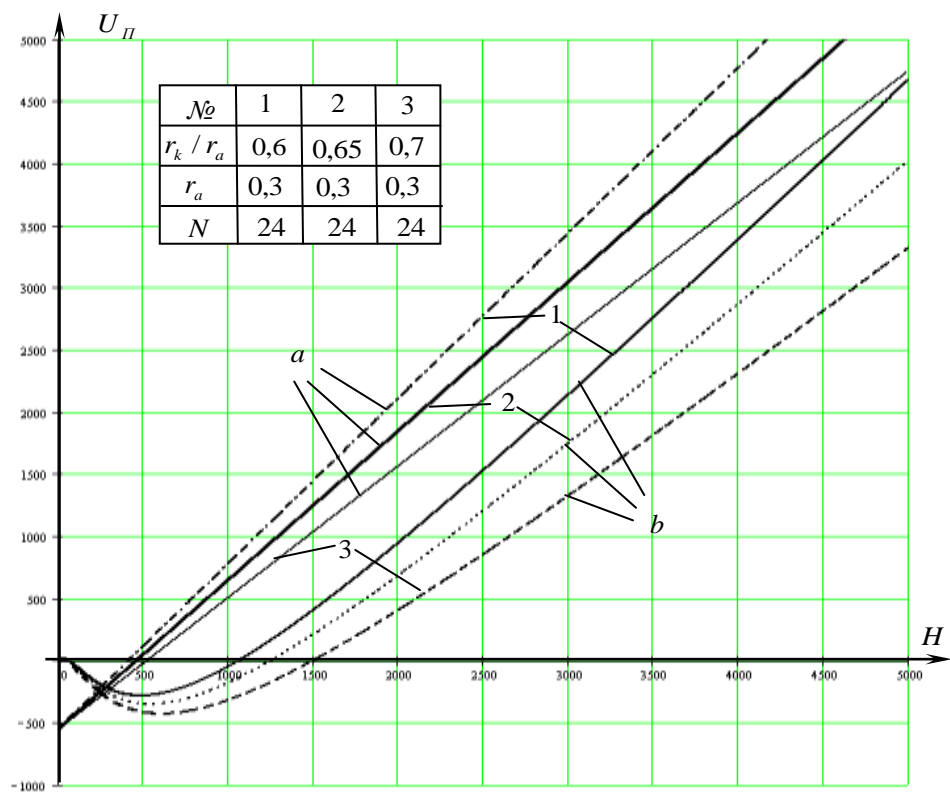


Рис. 2.24. Теоретична залежність порогової напруги магнетрона без урахування (а) та з урахуванням (б) циклоїдального характеру руху електронів при  $r_a = 0,30\text{см}$  і  $N = 24$

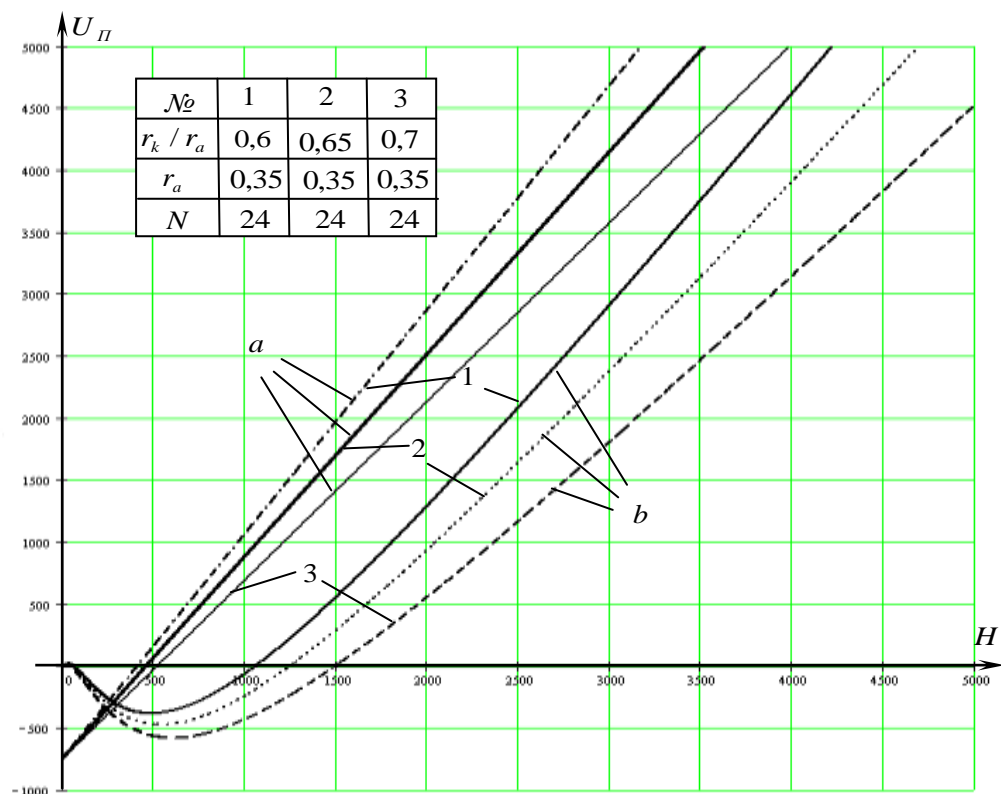


Рис. 2.25. Теоретична залежність порогової напруги магнетрона без урахування (а) та з урахуванням (б) циклоїдального характеру руху електронів при  $r_a = 0,35 \text{ см}$  і  $N = 24$ .

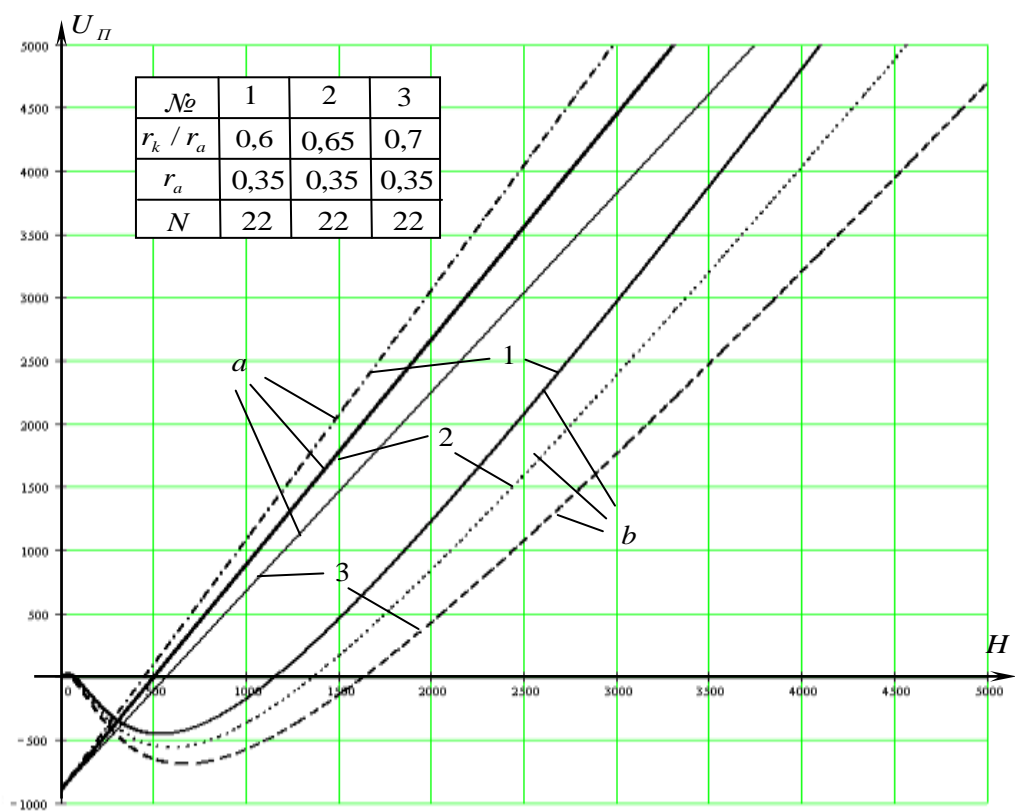


Рис. 2.26. Теоретична залежність порогової напруги магнетрона без урахування (а) та з урахуванням (б) циклоїдального характеру руху електронів при  $r_a = 0,35 \text{ см}$  і  $N = 22$ .

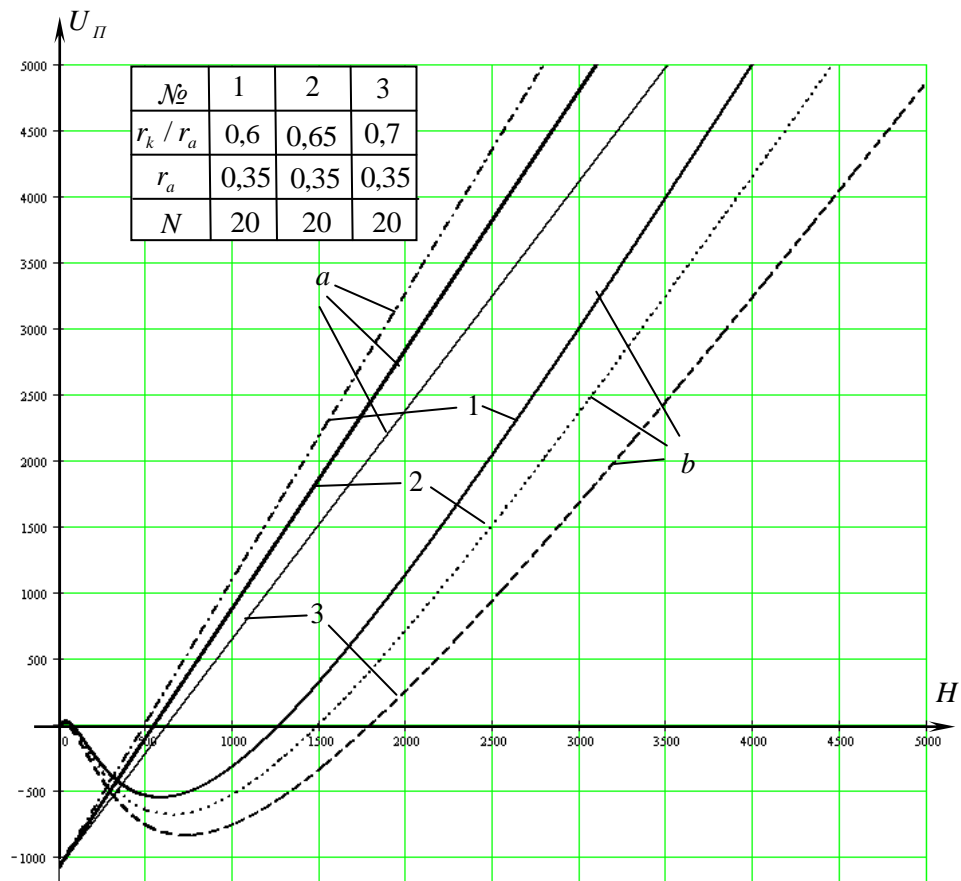


Рис. 2.27. Теоретична залежність порогової напруги магнетрона без урахування (а) та з урахуванням (б) циклоїдального характеру руху електронів при  $r_a = 0,35 \text{ см}$ ,  $N = 20$ .

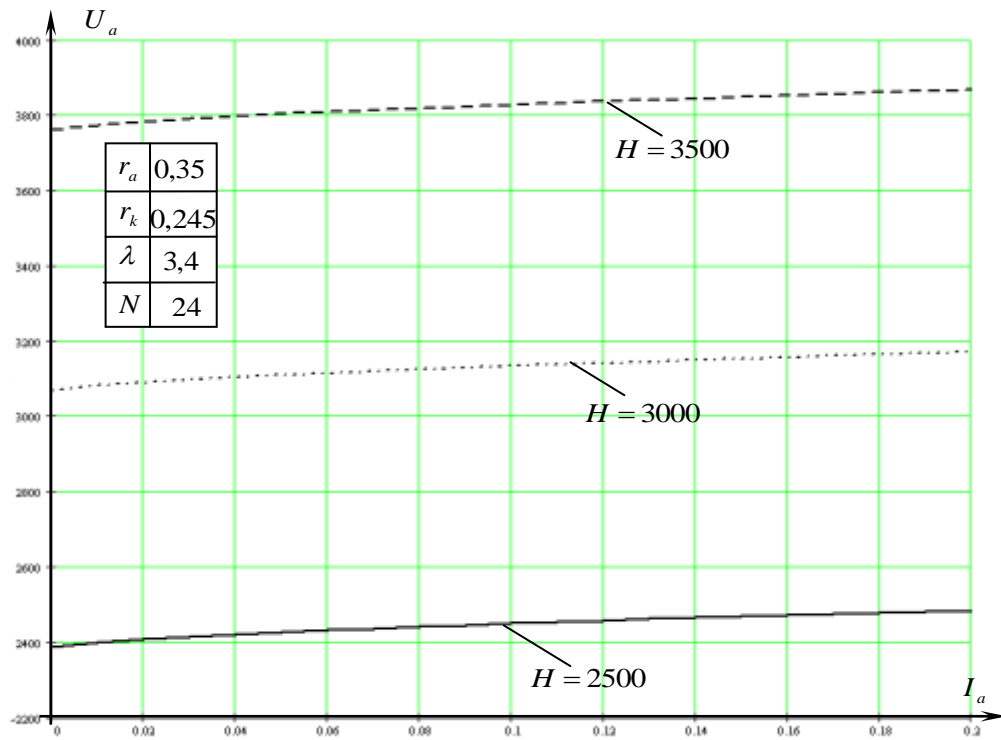
#### 2.4.4. ВОЛЬТ-АМПЕРНА ХАРАКТЕРИСТИКА ТА КОЕФІЦІЄНТ КОРИСНОЇ ДІЇ МАГНЕТРОНА

Вольт-амперна характеристика магнетрона описується співвідношенням

$$U_a = \frac{1884 \cdot H}{N\lambda} (r_a^2 - r_k^2) - \frac{8,08 \cdot 10^7 r_a^2}{N^2 \lambda^2 \left[ 1 + \frac{21300}{N\lambda H} \right]^2} + \left[ \frac{2900 \cdot I_a N H (r_a - r_k)^4}{\sqrt{U_a} h r_a^2} \right]^{2/3} \quad (2.20^*)$$

де  $h$  – висота анодного блоку [см];  $I_a$  – анодний струм [А].

На рис. 2.28 зображені теоретичні залежності вольт-амперних характеристик магнетрона при різних значеннях напруженості магнітного поля.



**Рис.2.28. Вольт-амперні характеристики магнетрона**

Втрати енергії в магнетроні відбуваються по наступним причинам:

- електрони попадають на анод з великими швидкостями (до 30% від прикладеної напруги);
- розігрів поверхні анодного блоку наведеними високочастотними струмами (до 20 % коливальної потужності).

Загальний к.к.д. магнетрона визначається формулою:  $\eta = \eta_e \cdot \eta_c$ ,

де електронний к.к.д.  $\eta_e$  визначається формулою:

$$\eta_e = 1 - \frac{1}{U_a} \left[ \left( \frac{2900 \cdot I_a N H (r_a - r_k)^4}{\sqrt{U_a} h r_a^2} \right)^{2/3} + \frac{8,08 \cdot 10^7 r_a^2}{N^2 \lambda^2 \left[ 1 + \frac{21300}{N \lambda H} \right]^2} \right]. \quad (2.21)$$

На рис.2.29 зображені теоретичні залежності електронного коефіцієнта корисної дії магнетрона від значення анодного струму при різних значеннях напруженості магнітного поля.

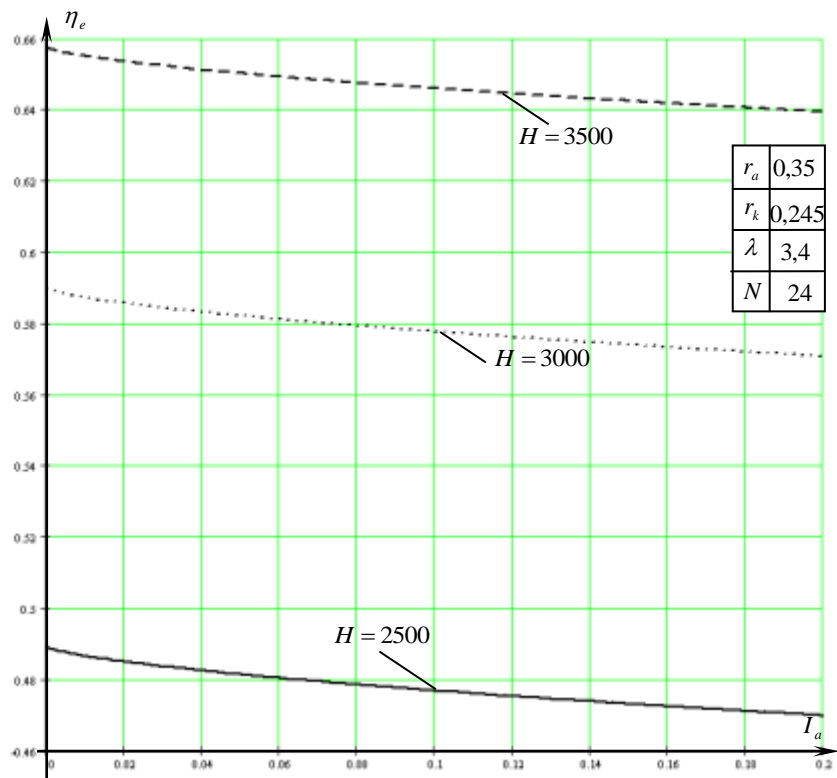
Електронна коливальна високочастотна потужність

$$P_e = \eta_e \cdot P_a = \eta_e \cdot U_a \cdot I_a,$$

де  $\eta_c = 0,8 \div 0,9$  коефіцієнт корисної дії коливальної системи.

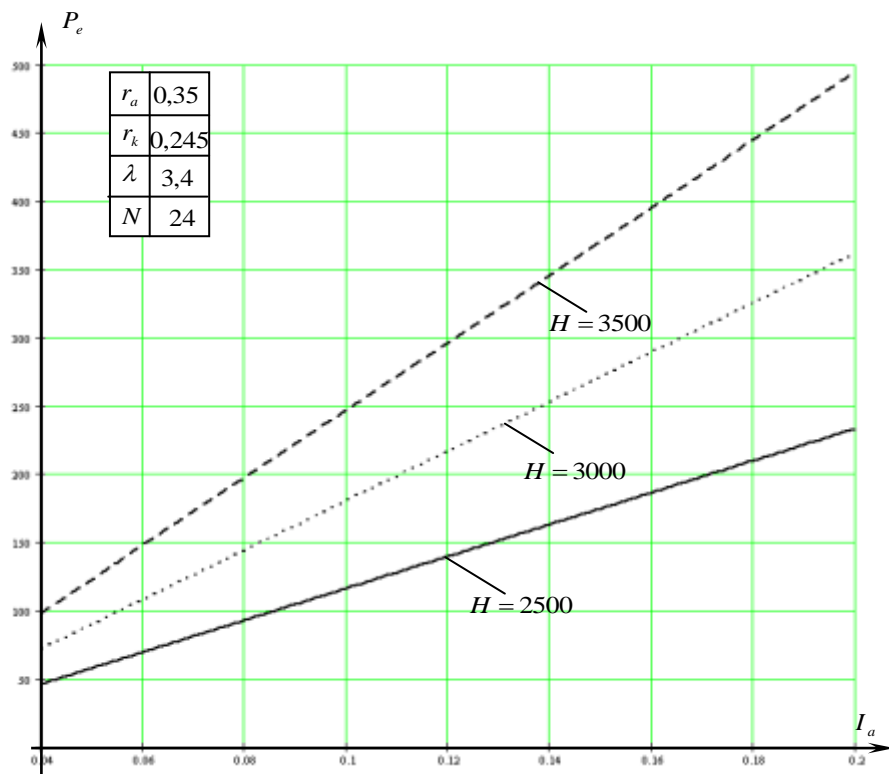
Тоді вихідна потужність магнетрона визначається формулою:

$$P_{вих} = \eta U_a I_a = \eta_c P_e.$$



**Рис.2.29. Теоретичні залежності електронного коефіцієнта корисної дії магнетрона від анодного струму при різних значеннях напруженості магнітного поля**

На рис.2.30 зображені залежності електронної високочастотної потужності від анодного струму при різних значеннях напруженості магнітного поля.



**Рис.2.30. Теоретичні залежності електронної високочастотної потужності від анодного струму при різних значеннях напруженості магнітного поля**



### **3. КОНСТРУКТИВНО-ТЕХНОЛОГІЧНІ ОСОБЛИВОСТІ МАГНЕТРОНА**

Вибір багаторезонаторного магнетрона в якості генератора НВЧ-коливань обумовлений високим коефіцієнтом корисної дії при відносно простій конструкції та стійкістю його роботи при неузгодженому навантаженні.

Пристрій складається з наступних основних вузлів:

- 1) анодного блоку магнетрона, який має резонаторну систему та пристрої для розділення видів коливань;
- 2) катодного вузла з відповідними виводами;
- 3) виводу енергії;
- 4) магнітної системи;
- 5) системи охолодження.

Анодний блок представляє собою 24-х резонаторну систему секторного типу. Резонаторна система секторного типу технологічно проста, виготовлена електроіскровою обробкою (можна шляхом пайки лопаток (ламелей) в циліндричне тіло корпусу анода).

Для розділення видів коливань в магнетроні використовуються кільця зв'язку, конструктивно виконані у вигляді провідників прямокутного перетину, які з'єднують сегменти резонаторів анодного блоку через один. Для підсилення дії кілець зв'язку при збереженні симетрії коливальної системи застосовують двократне кільцеве зв'язування з двох сторін анодного блоку, що дозволяє збільшити зв'язок між резонаторами та покращити розділення видів коливань за частотою. Кільця зв'язку приєднуються до сегментів анодного блоку пайкою.

Катодний вузол представляє собою імпрегнований катод циліндричної форми. Катодний блок розміщується на катодній ножці контактним

зварюванням. Катодний вузел з катодною ножкою приварюється лазерним зварюванням до корпусу анодного блока.

Вивід енергії представляє собою плавний перехід з  $H$ -подібного хвилеводу на прямокутний хвилевід з перетином  $23 \times 10 \text{ мм}$ . Такий вивід енергії має достатню широку частотну смугу, що дозволяє сильно зв'язати з навантаженням коливання не тільки на  $\pi$ -виді, але й на інших (небажаних) видах коливаний. Дякуючи цьому полегшується усунення паразитних видів коливаний. Вивід енергії з'єднується з резонаторною системою пайкою.

Магнітна система магнетрона забезпечує магнітне поле з напруженістю  $H = (2400 \div 3200)E$ .

В магнетронах, як і в багатьох інших електронних пристроях НВЧ, широке розповсюдження отримала пакетована система, при якій постійний магніт є конструктивною частиною самого приладу. В якості основного матеріалу для постійних магнітів використовуються спеціальні магнітні сплави, які мають велику коерцитивну силу і велику залишкову індукцію.

В пакетованих магнетронах полюсні наконечники із спеціальних ферромагнітних матеріалів входять з торців в середину магнетрона. Цим значно зменшується повітряний проміжок між полюсами, який складає основну частину магнітного опору ланки.

Система охолодження представляє собою випаровувально-конденсовану систему, яка складається з камери кипіння, камери конденсації та радіатора з розвинутою поверхнею теплообміну. Система охолодження має просту конструкцію, стабільність утримання робочої температури, малу масу і габарити.

## В И С Н О В К И

1. Порівняльна характеристика параметрів та застосування магнетронних генераторів підтвердили доцільність використання магнетронна в якості надійного та високоефективного джерела надвисокочастотних коливань.

2. В роботі була вибрана конструкція магнетрона з багаторезонаторною системою, яка працює на  $\pi$  –виді коливань. Приведені методики розрахунку резонаторів типів: резонатор у вигляді щілина-отвір; резонатор секторного типу. Для сантиметрового діапазону доцільно використовувати резонатор «щілина-отвір», а при переході в міліметровий діапазон необхідно вибирати в якості коливальної системи резонатор секторного типу.

3. Згідно з методикою розраховані параболи критичного режиму магнетрона, залежність потенціалу синхронізації від числа резонаторів, залежність порогової напруги від напруженості магнітного поля, вольт-амперна характеристика, залежність електронної високочастотної потужності та електронного коефіцієнта корисної дії від анодного струму та напруженості магнітного поля.

4. Дослідження показали, що для генерування на частоті  $9375 \pm 25$  МГц необхідно забезпечити напругу 2500...3200 В при напруженості магнітного поля 2600...3000 Ерстед. При цьому вихідна потужність 50...100 Вт при коефіцієнті корисної дії  $35 \pm 5\%$ . Основні конструктивні параметри резонансної системи наступні: радіус катода  $r_k = 0,24$  см; радіус анода  $r_a = 0,35$  см; кількість резонаторів  $N = 24$ .

## ПЕРЕЛІК ВИКОРИСТАНОЇ НАУКОВО-ТЕХНІЧНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Кукарин С.В. Электронные СВЧ приборы. – М.: Радио и связь, 1981. – 272 с.
2. Самсонов Д.Е. Основы расчета и конструирования многорезонаторных магнетронов. – М.: Сов.радио, 1966. – 216 с.
3. Коваленко В.Ф. Введение в электронику сверхвысоких частот. – М.: Сов.радио, 1955. – 344 с.
4. Магнетроны сантиметрового диапазона: Пер. с англ./Под ред. С.А.Зусмановского. – М.: Сов.радио, 1950, т.1. – 420 с.
5. Магнетроны сантиметрового диапазона: Пер. с англ./Под ред. С.А.Зусмановского. – М.: Сов.радио, 1951, т.2. – 472 с.
6. Стальмахов В.С. Основы электроники сверхвысокочастотных приборов со скрещенными полями. – М.: Сов.радио, 1963. – 366 с.
7. Лебедев И.В. Техника и приборы СВЧ. Т.1. Электрорадиотехнические приборы СВЧ / Под ред. Н.Д.Девяткова. – М.: Высшая школа. – 1970. – 440 с.
8. Лебедев И.В. Техника и приборы СВЧ. – М.: Высшая школа, 1972, т.2. – 376 с.
9. Тараненко В.П. Електронні та квантові прилади НВЧ. – Вища школа, 1974. – 248 с.
10. Панин И.С., Панченко Л.В. Импульсные магнетроны. – М.: Сов.радио,
11. Левитский С.М., Кошечкина С.В. Вакуумная и твердотельная электроника СВЧ. – К.: Вища школа. – 1986. – 272 с.
12. Вамберский М.В., Казанцев В.И., Шелухин С.А./ Под ред. М.В.Вамберского. – М.: Высшая школа, 1984. – 448 с.
13. Бычков . Вопросы теории и практического применения приборов магнетронного типа. – М.: Сов.радио, 1967. – 216 с.